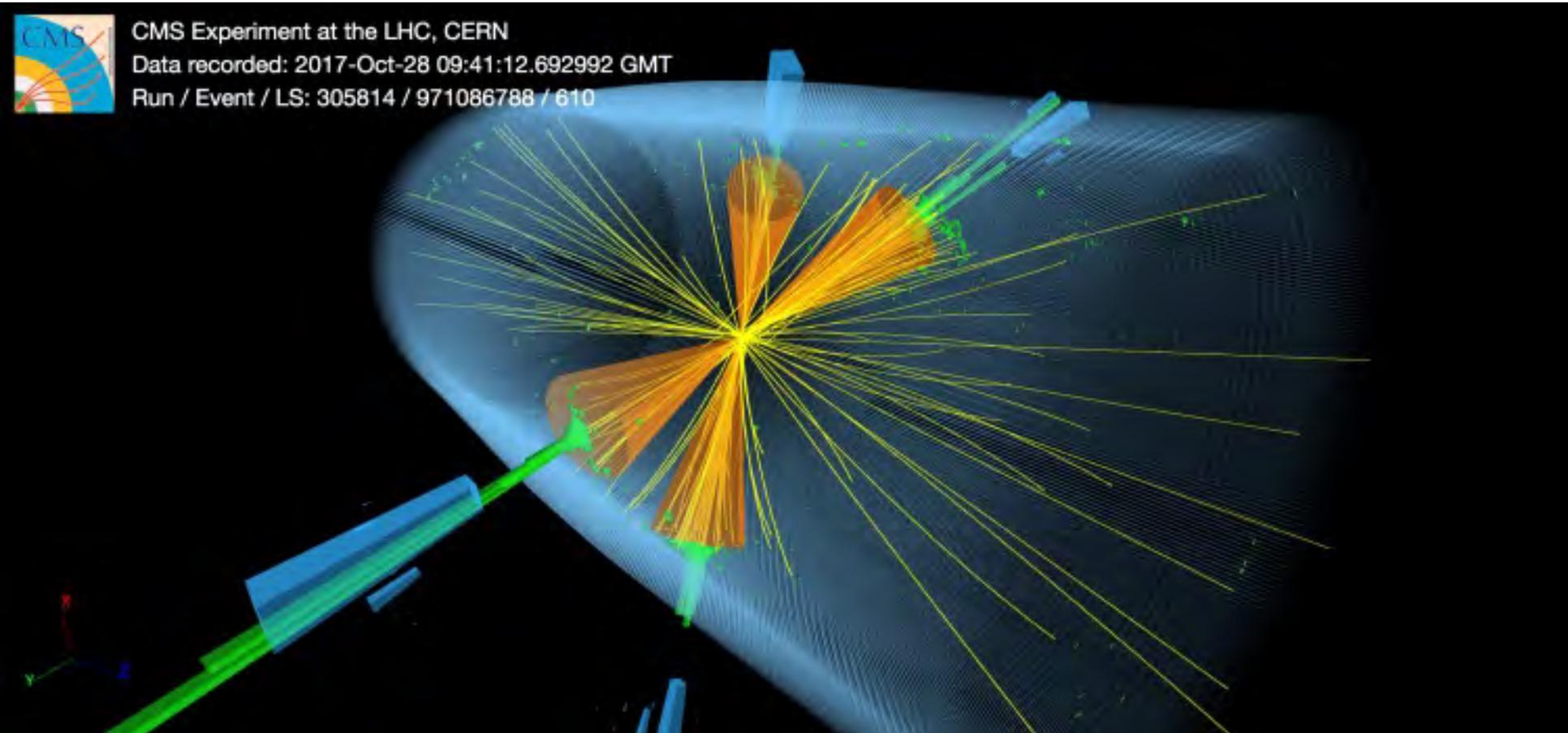


Der Large Hadron Collider: Forschung und Zukunftsperspektive



Lea Caminada (PSI | UZH)

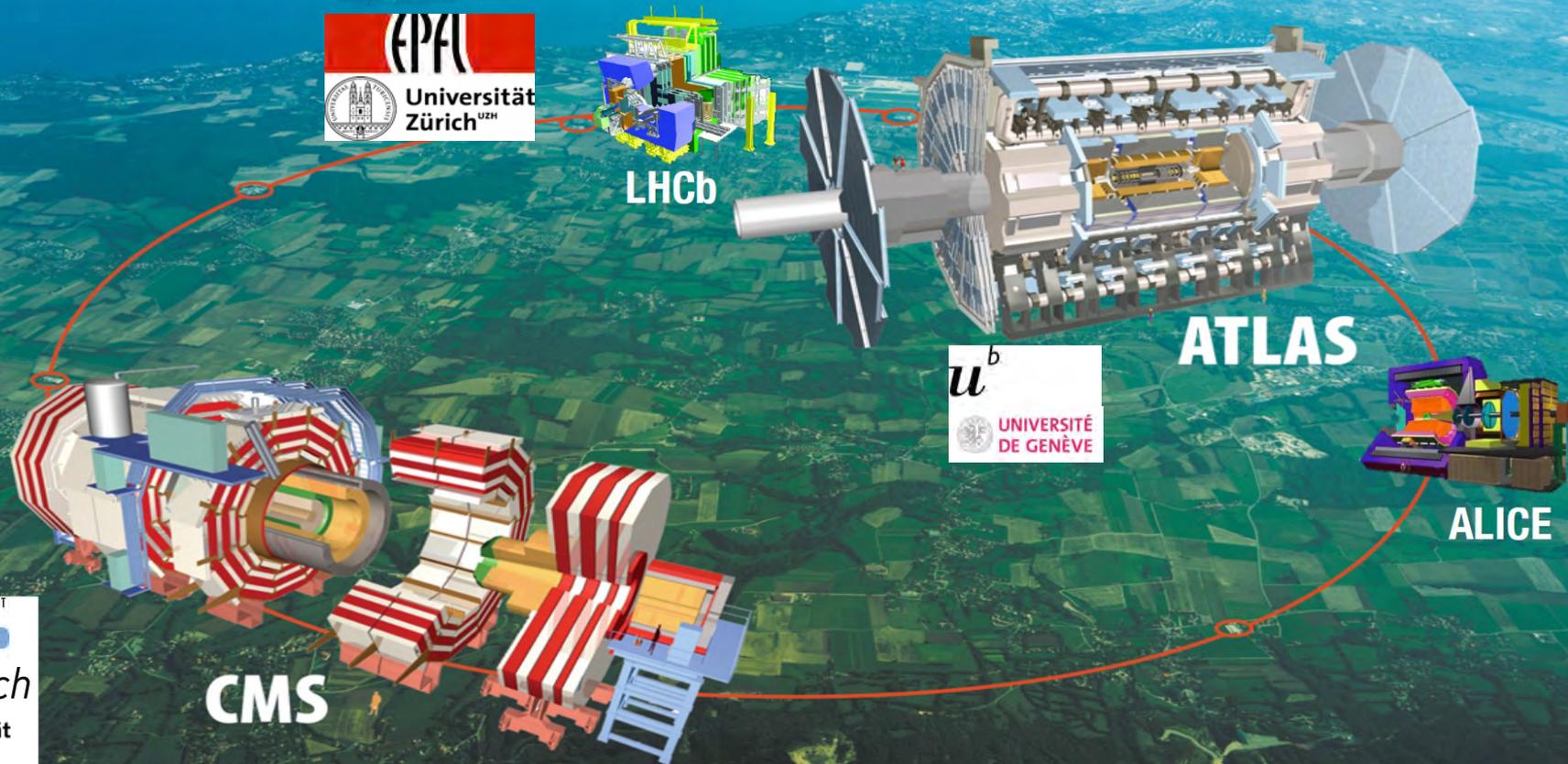
6.11.2023

Der Large Hadron Collider (LHC)

27 km langer Teilchenbeschleuniger am CERN

Proton-proton Kollisionen bei höchsten Energien ($E_{cm}=13$ TeV)

In Betrieb seit 2009

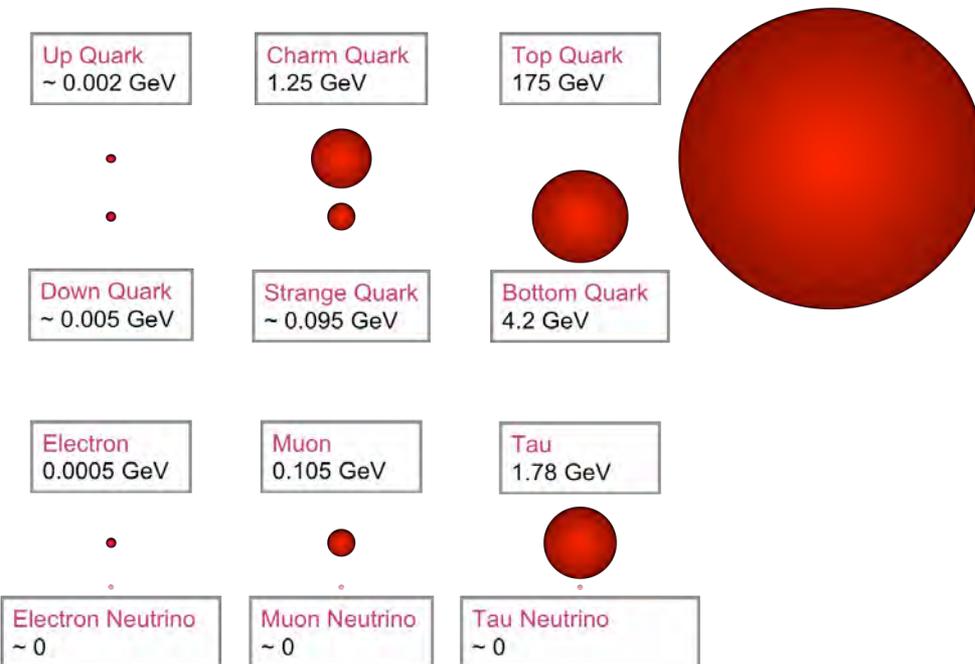


→ LHC ermöglicht es, die Gesetze der Physik bei höchsten Energien/kleinsten Dimensionen experimentell zu überprüfen

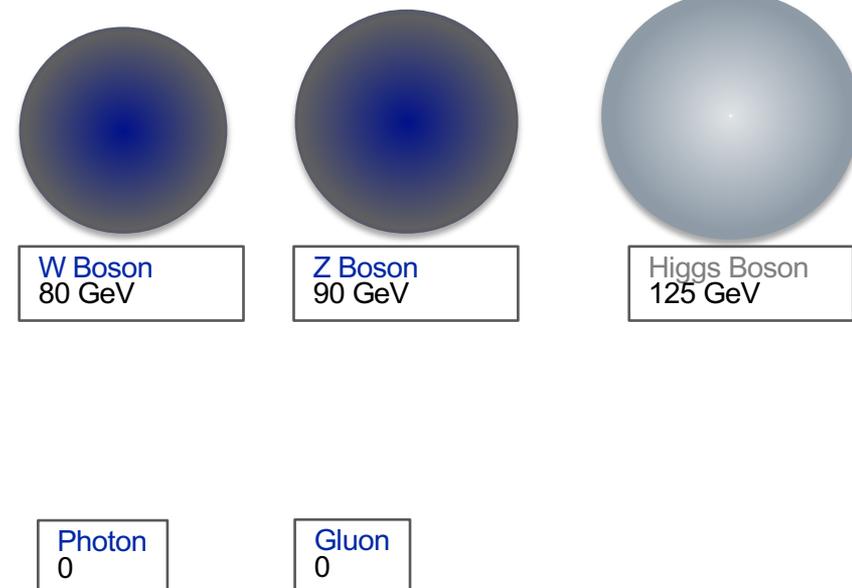
Standardmodell der Teilchenphysik

Beschreibt unser derzeitiges Verständnis der Grundbausteine und Wechselwirkungen. Vorhersagen wurden in den letzten Jahrzehnten sehr genau getestet.

Grundbausteine der Materie



Träger der Kräfte



Zuletzt entdeckt:
Higgs Boson
(2012)

Aber auch viele offene Fragen: Warum diese Anordnung? Gibt es mehr Grundbausteine? Wie passt die Gravitation ins Bild? Lassen sich die Kräfte vereinheitlichen? ...

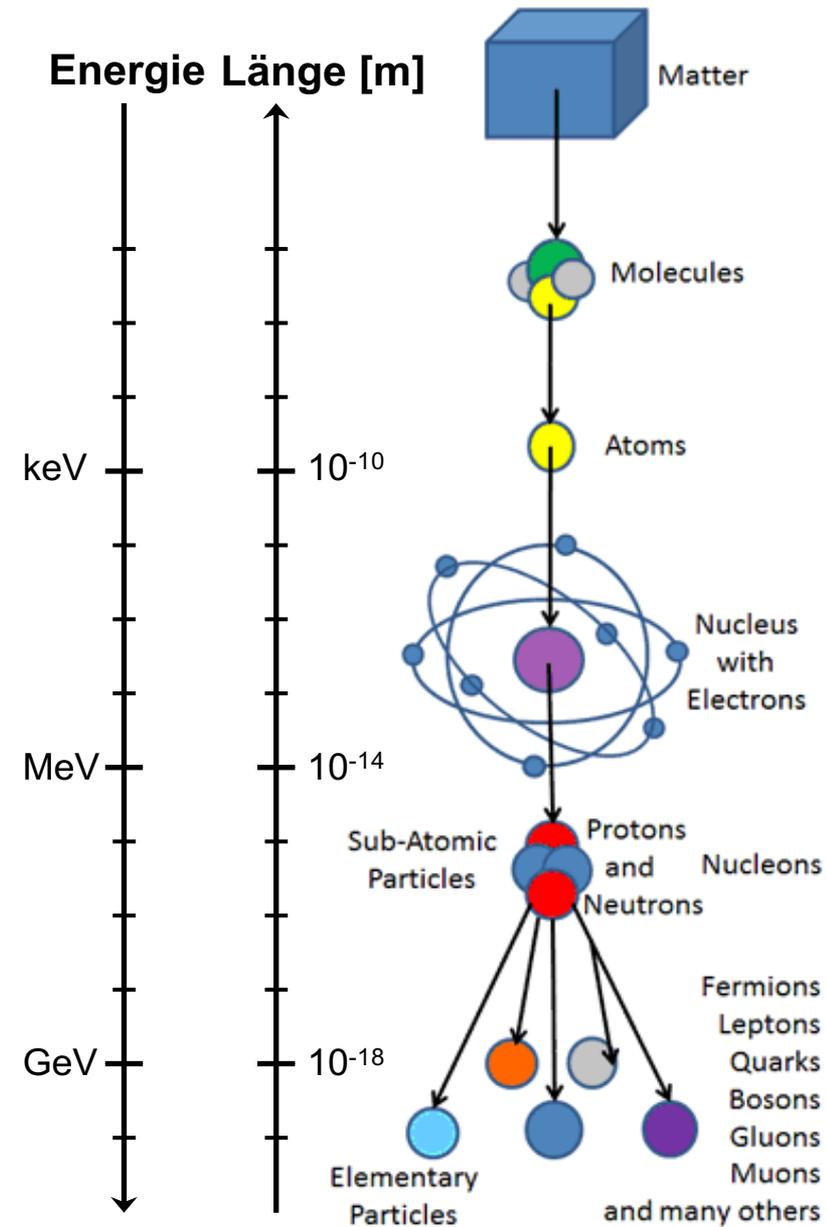
Struktur der Materie

- Ziel der Teilchenphysik ist die Erforschung von fundamentalen Teilchen und Kräften
- Die Quantenmechanik beschreibt die Physik im (sub)atomaren Bereich
 - Wellen-Teilchen-Dualität
 - de Broglie Wellenlänge λ

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

h : Planck Konstante
 p : Teilchenimpuls

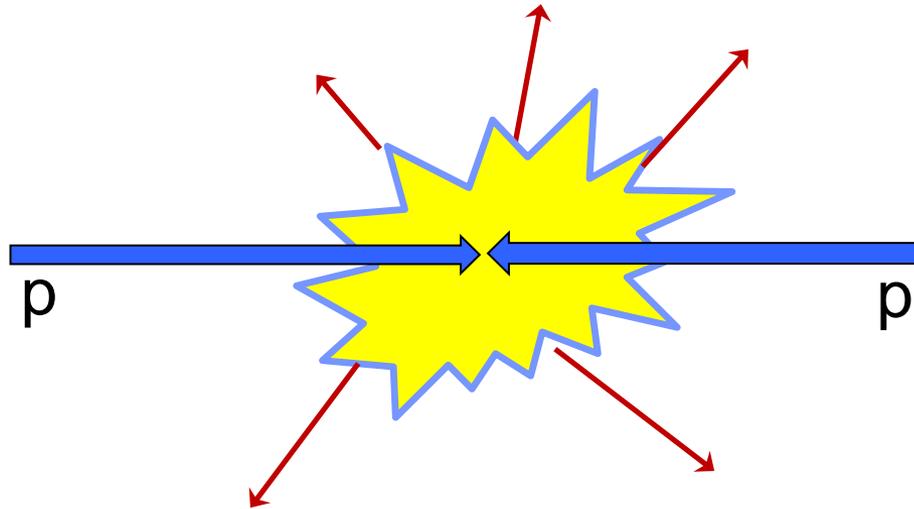
→ Brauchen viel Energie um kleine Strukturen aufzulösen



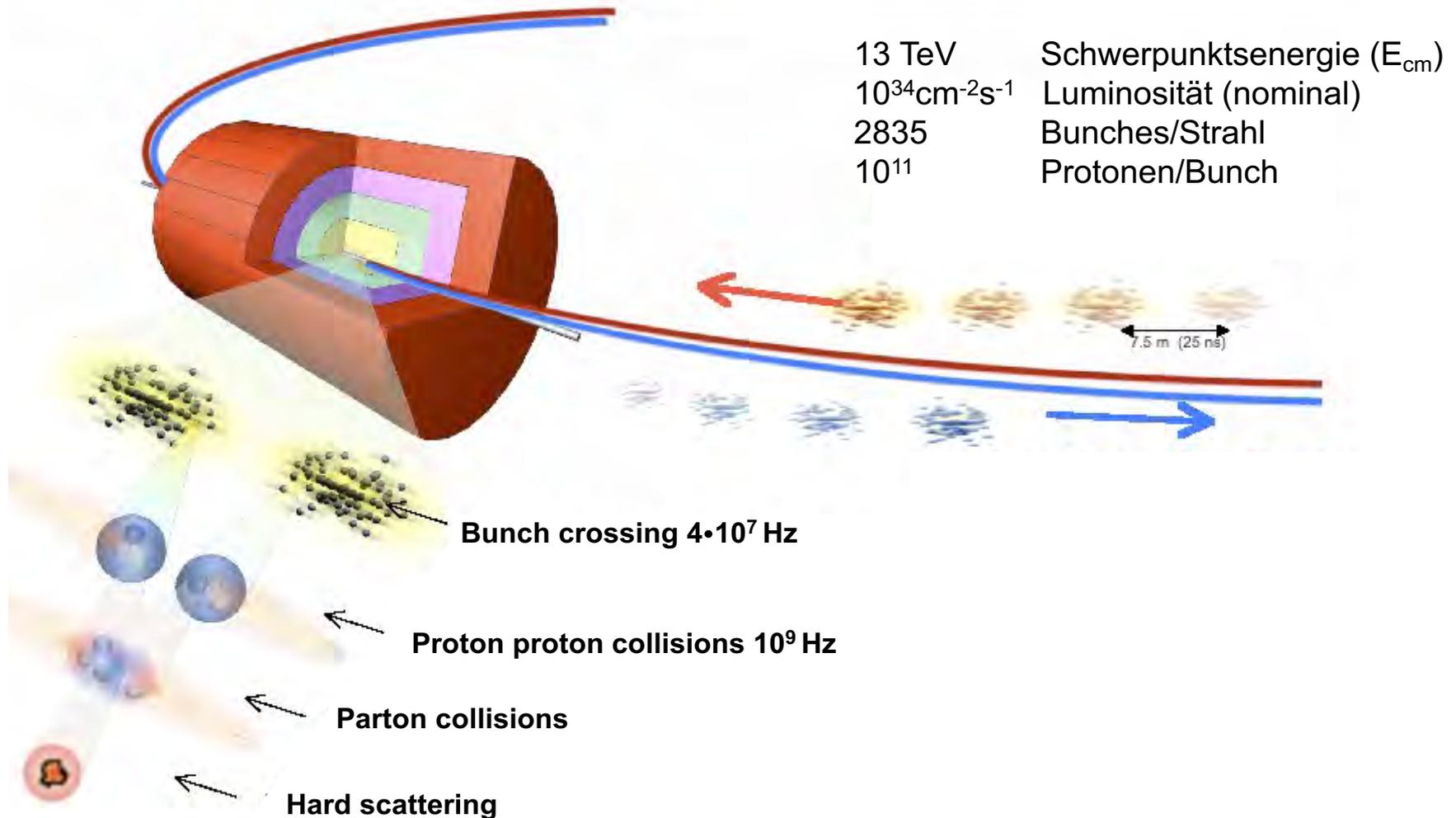
Teilchenkollisionen

- Da die meisten Elementarteilchen instabil sind, müssen wir sie im Experiment erzeugen

$$E = mc^2$$



Kollisionen in LHC Experimenten



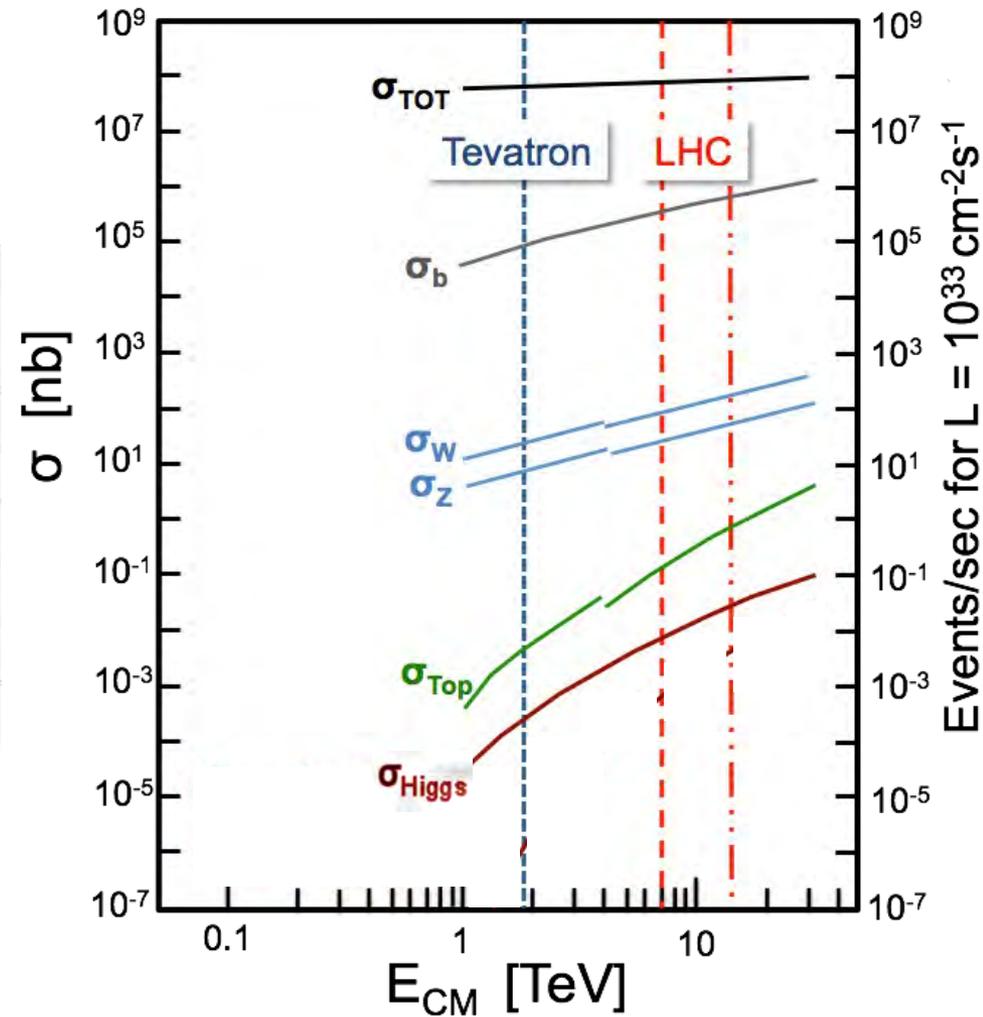
Physik der Kollisionen

- Erwartete Rate von Ereignis für einen bestimmten Prozess:

$$R = \sigma \cdot L$$

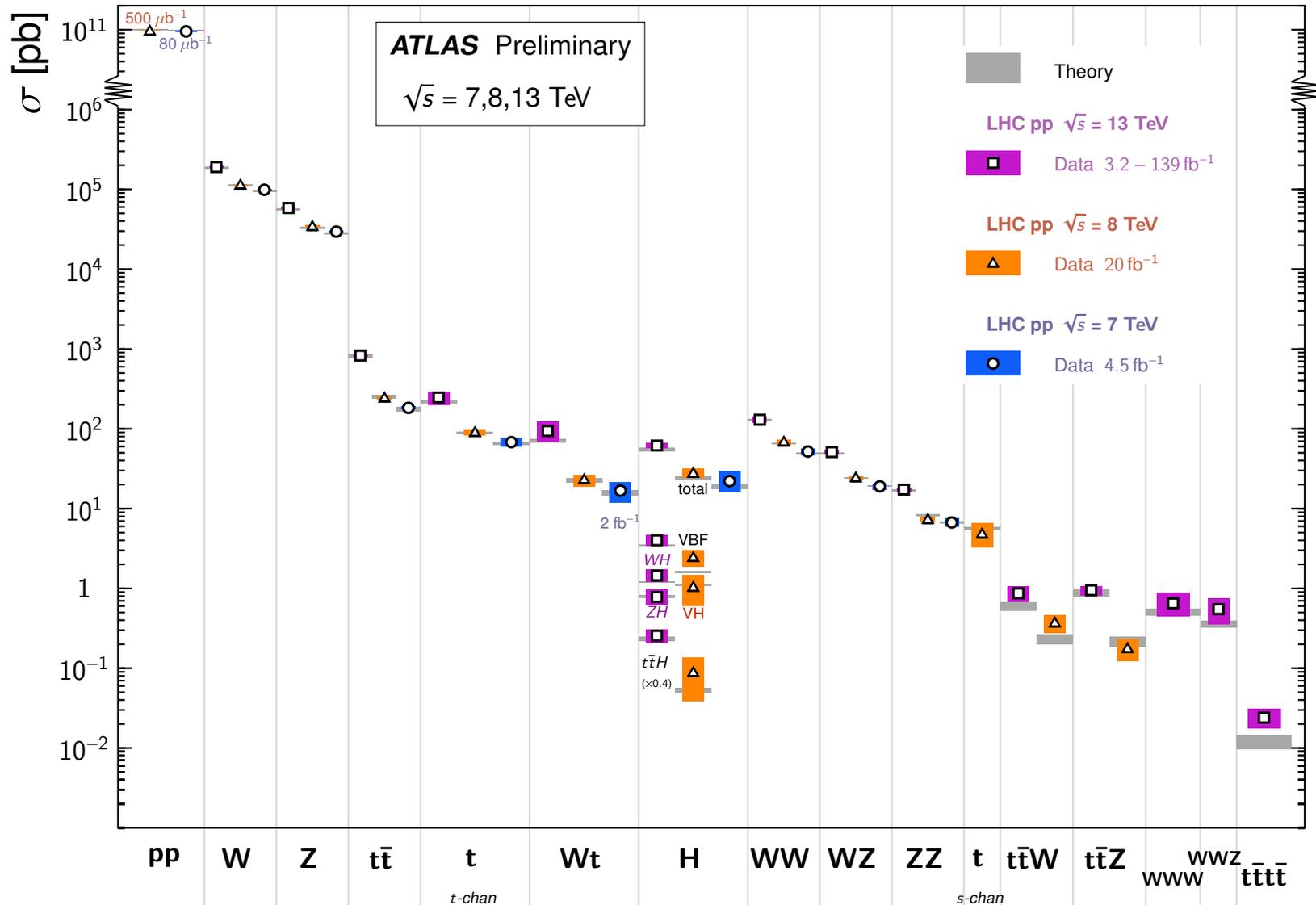
Process	Cross section (nb) @ 14 TeV	Production rates (Hz) @ $\mathcal{L} = 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
inelastic	10^8	10^9
$b\bar{b}$	5×10^5	5×10^6
$W \rightarrow \ell\nu$	15	150
$Z \rightarrow \ell\ell$	2	20
$t\bar{t}$	1	10
$H \rightarrow \gamma\gamma$	10^{-4}	10^{-3}

- Interessante Ereignisse müssen aus einer riesigen Anzahl Kollisionen herausgefiltert werden...



Messungen des Standardmodells am LHC

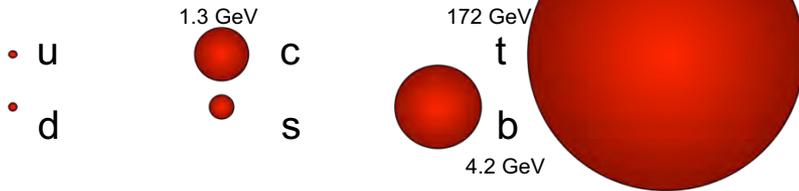
Standard Model Total Production Cross Section Measurements *Status: March 2021*



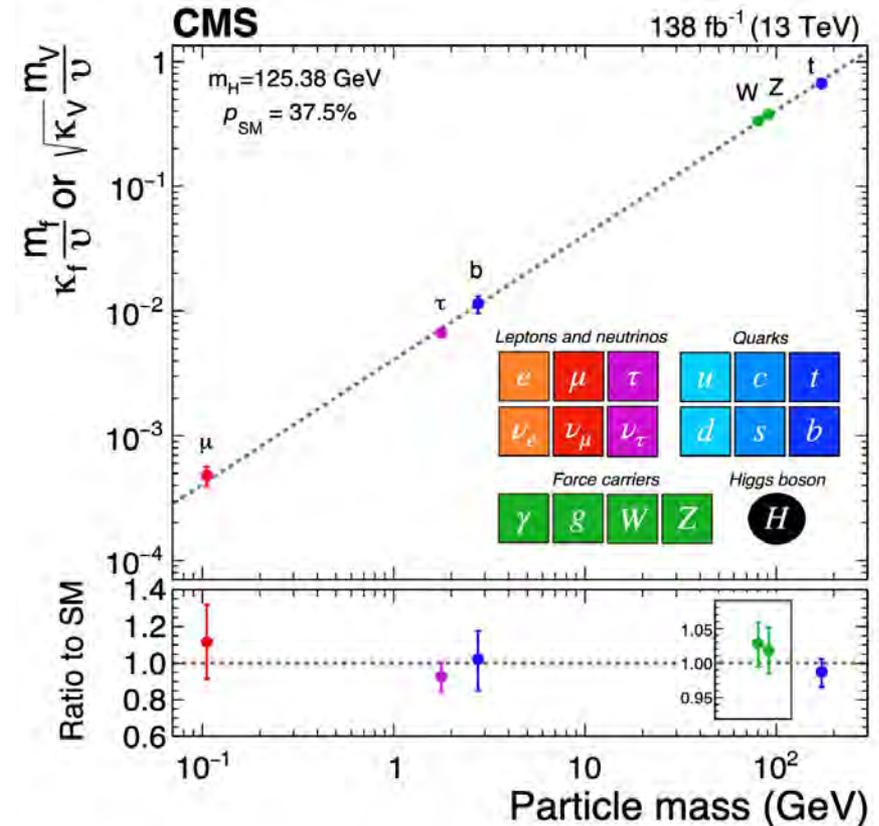
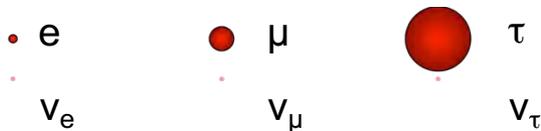
Das Higgs Boson

- Einzigartiges Teilchen im Standardmodell
 - Kopplungsstärke zu anderen Teilchen ist abhängig von der Masse und genau vorhergesagt

Quarks

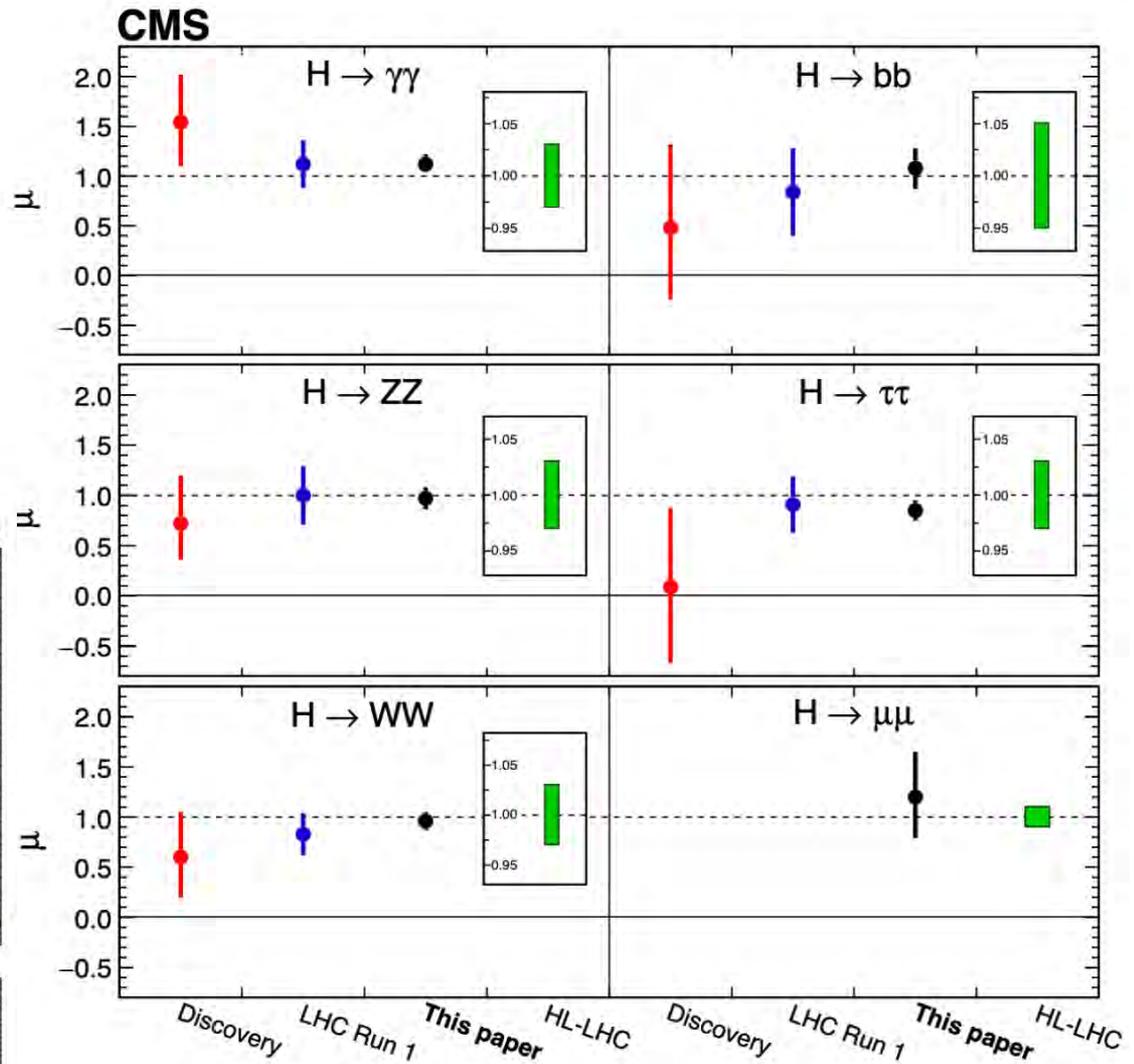
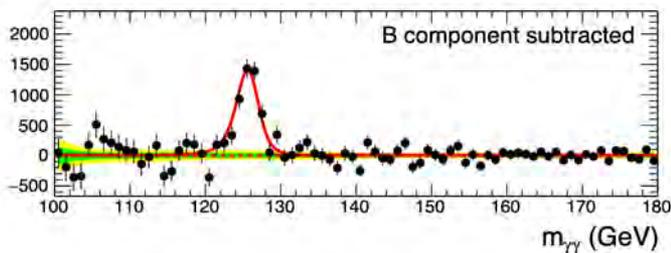
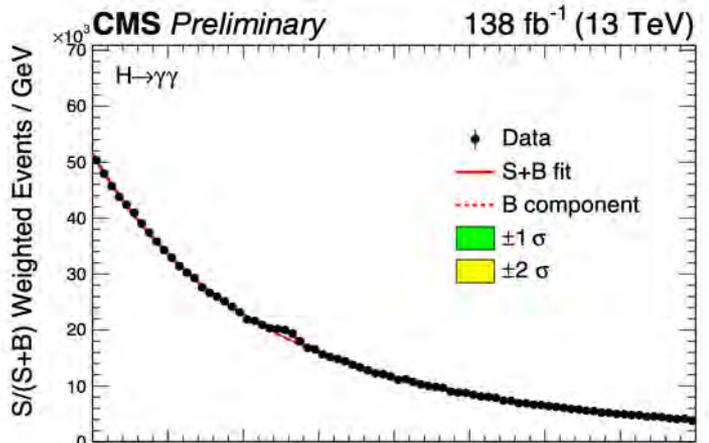
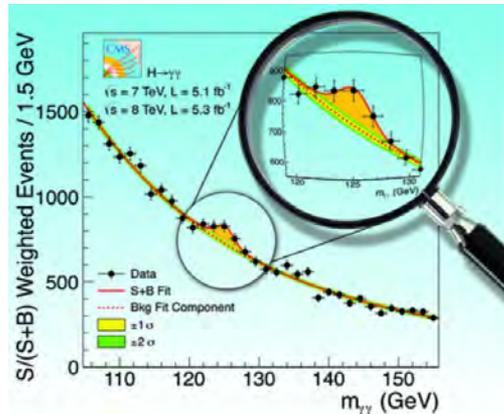


Leptons



- Vielzahl von Messungen der Eigenschaften des Higgs Bosons
- Streben nach höherer Präzision, da kleine Abweichungen von der Erwartung Hinweise auf neue Physik geben können

10 Jahre nach der Entdeckung des Higgs Bosons

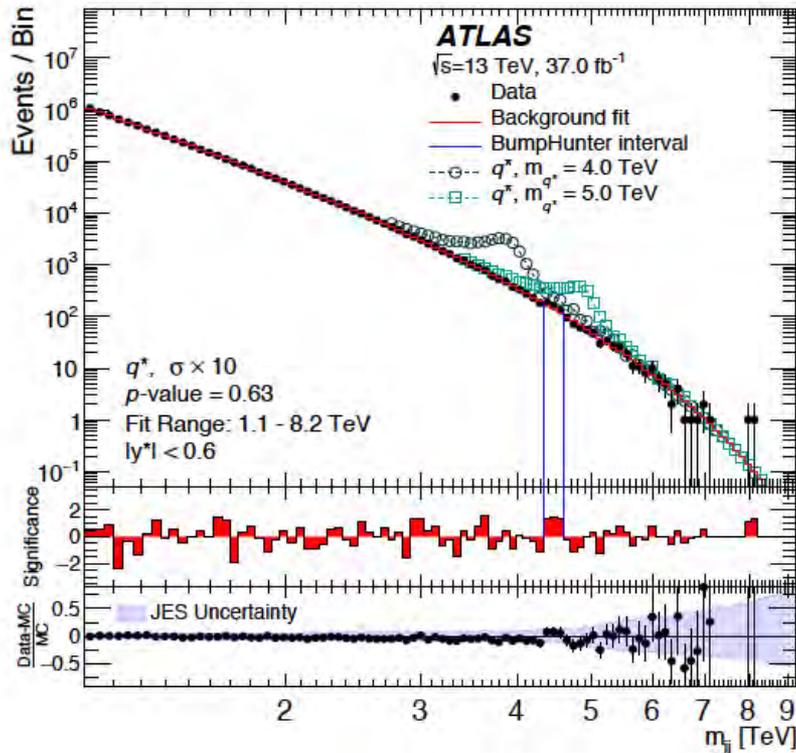


→ Entering the era of precision physics with the Higgs boson

Direkte Suche nach neuer Physik

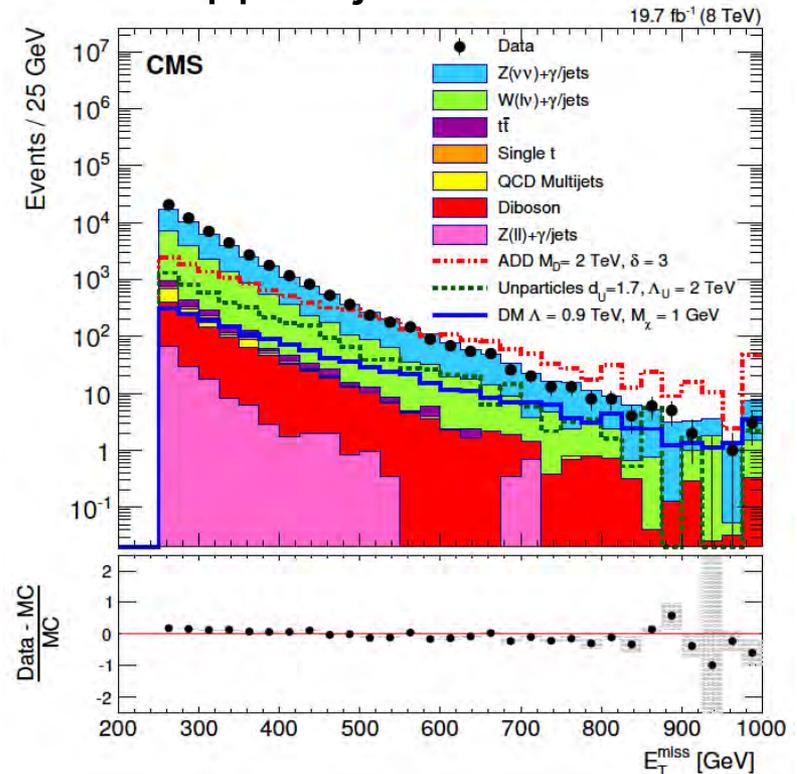
- Suche nach Resonanzen von neuen schweren Teilchen

$pp \rightarrow X \rightarrow \text{jet}+\text{jet}$



- Suche nach «fehlender Energie» (z.B. dunkle Materie)

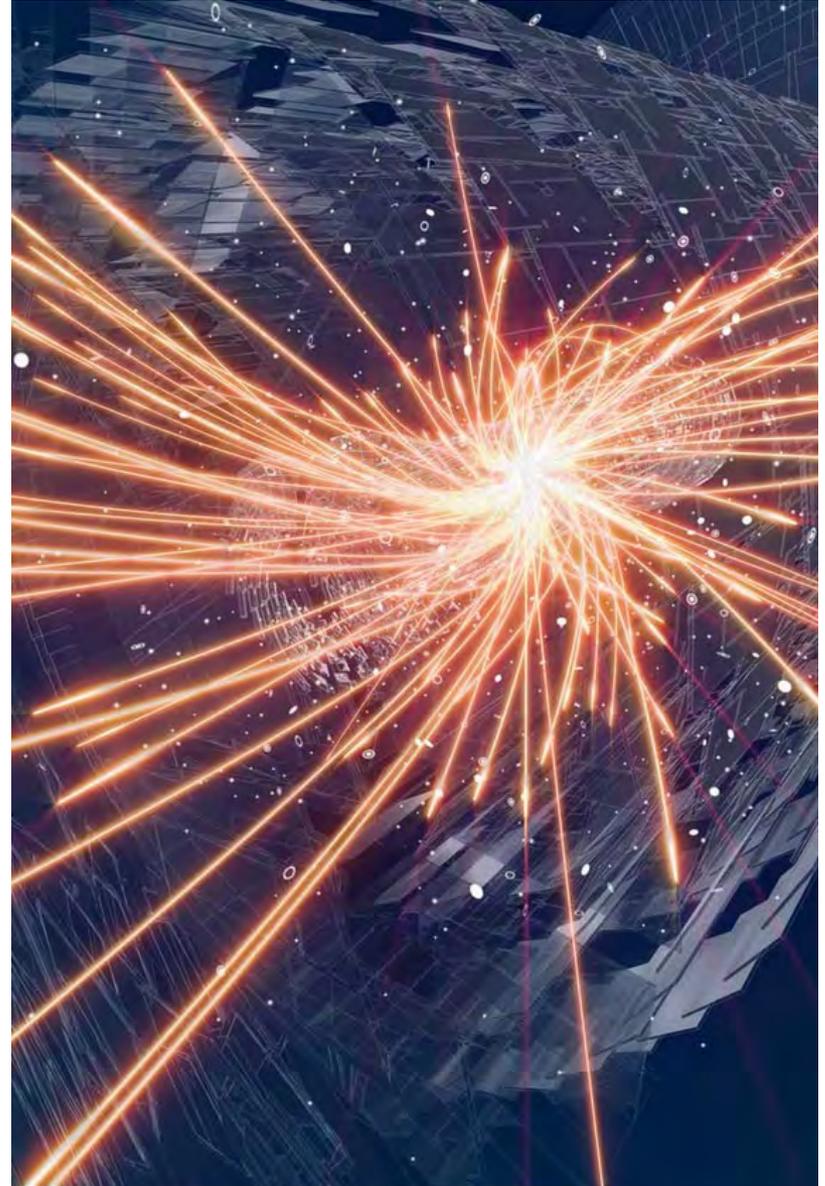
$pp \rightarrow \text{jet}+X$



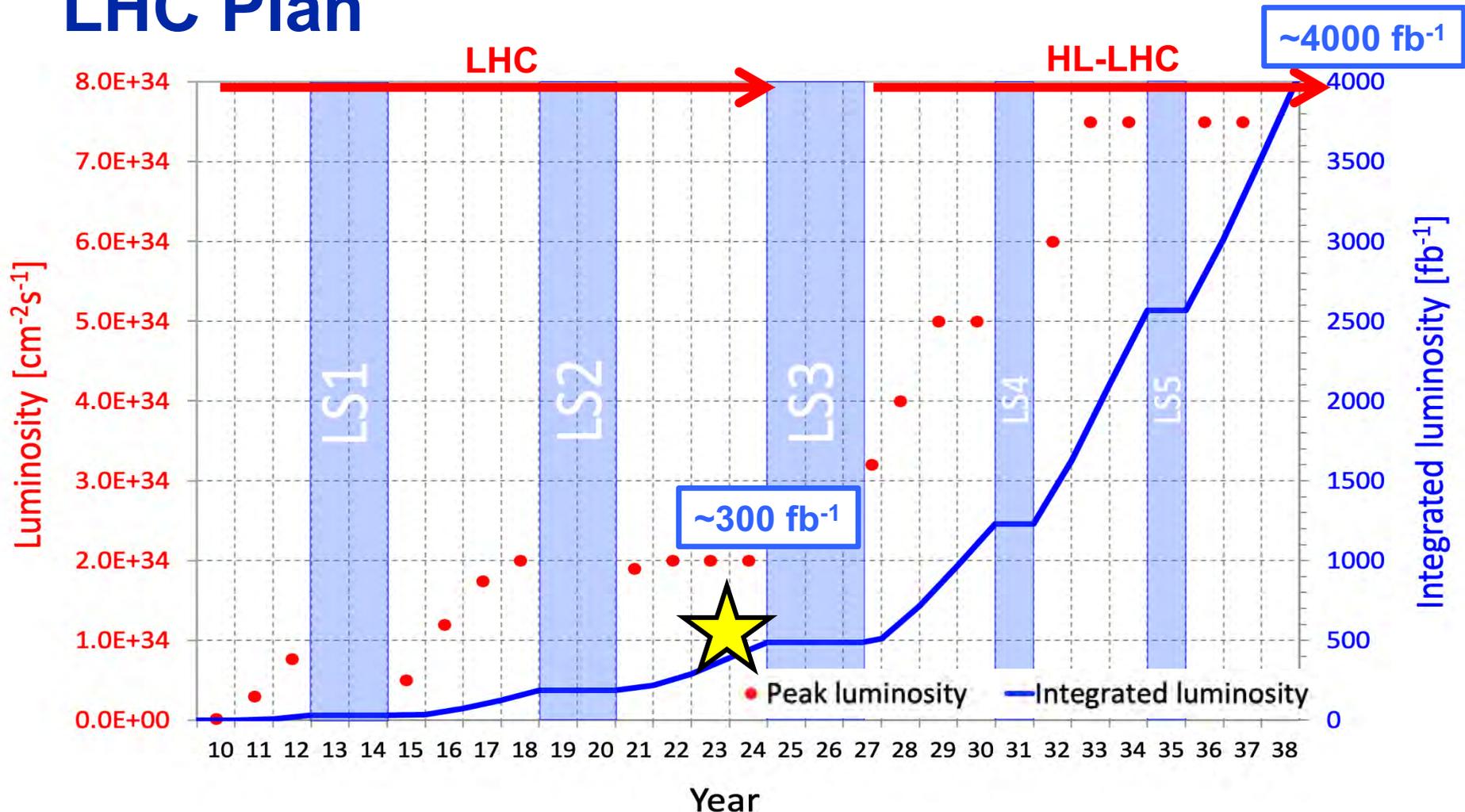
- Suche in vielen möglichen Endzuständen über grossen Massen/Energie-Bereich
- Bis jetzt keine Hinweise auf neue Physik

Wie weiter?

- Streben nach höherer Messgenauigkeit und der Erforschung von bis jetzt unerschlossenen Bereichen
- Grössere Datenstatistik – höhere Luminosität
- Verbesserte Detektoren und neue Rekonstruktions- und Analysetechniken
- Neue Beschleuniger mit höheren Energien

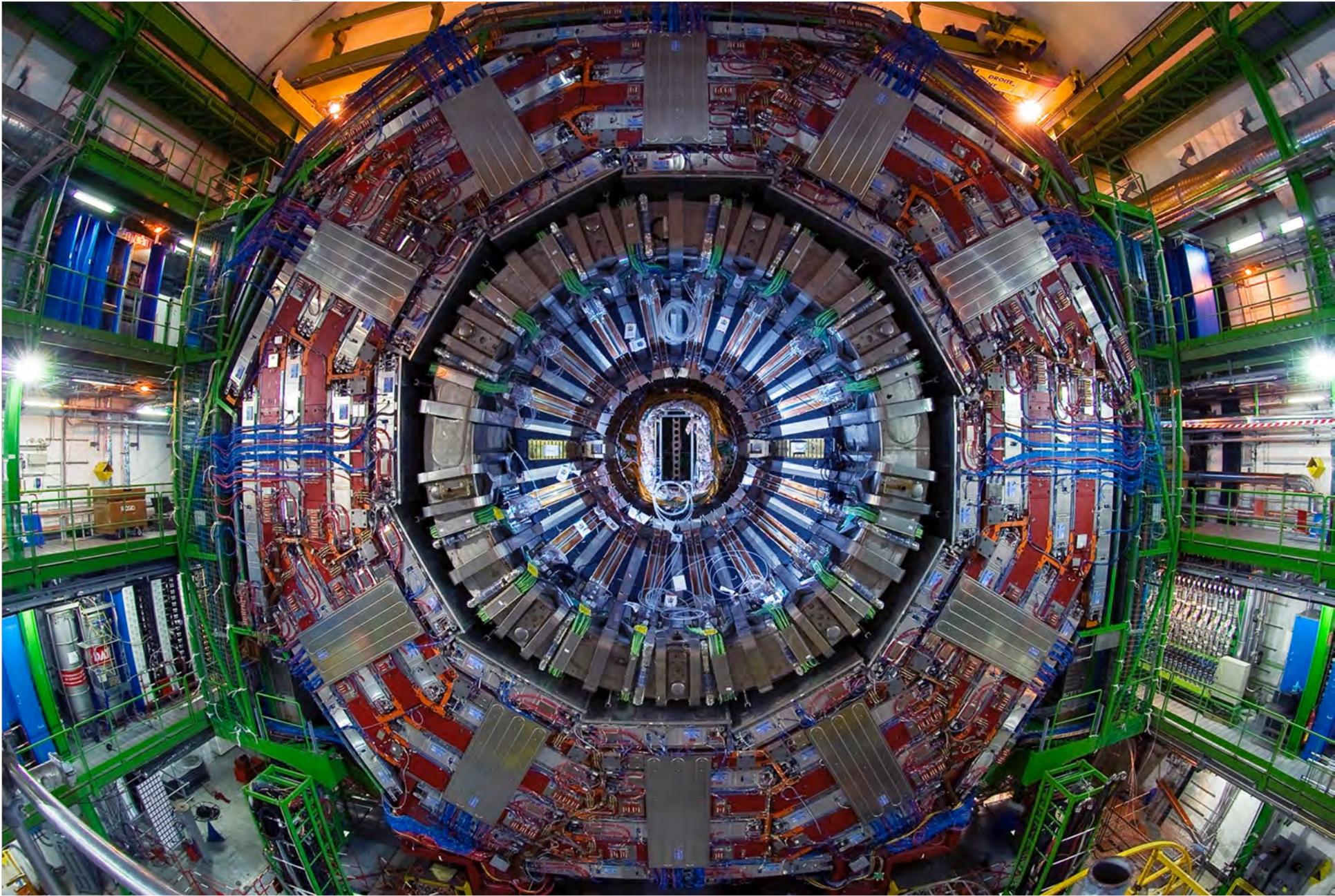


LHC Plan

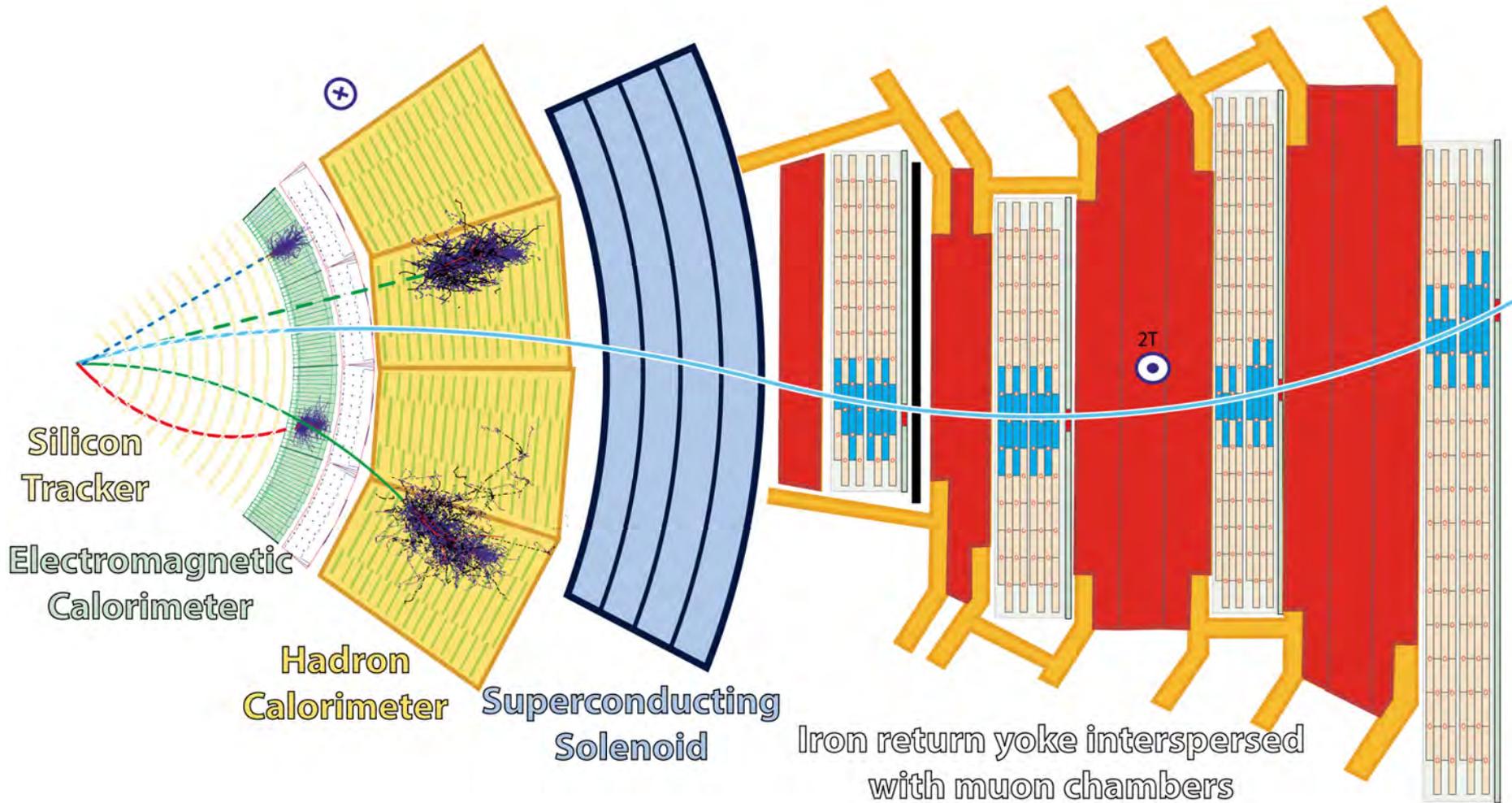


- LHC Run 3 wird 2022 beginnen, danach Upgrade des Beschleunigers, um höhere Luminosität zu erreichen (HL-LHC)
 - > Grosse Datenstatistik (10x mehr) für Präzisionsmessungen
- Herausforderung für Detektoren und Experimente

CMS Experiment



Identifikation der Teilchen in CMS



— Muon

— Electron

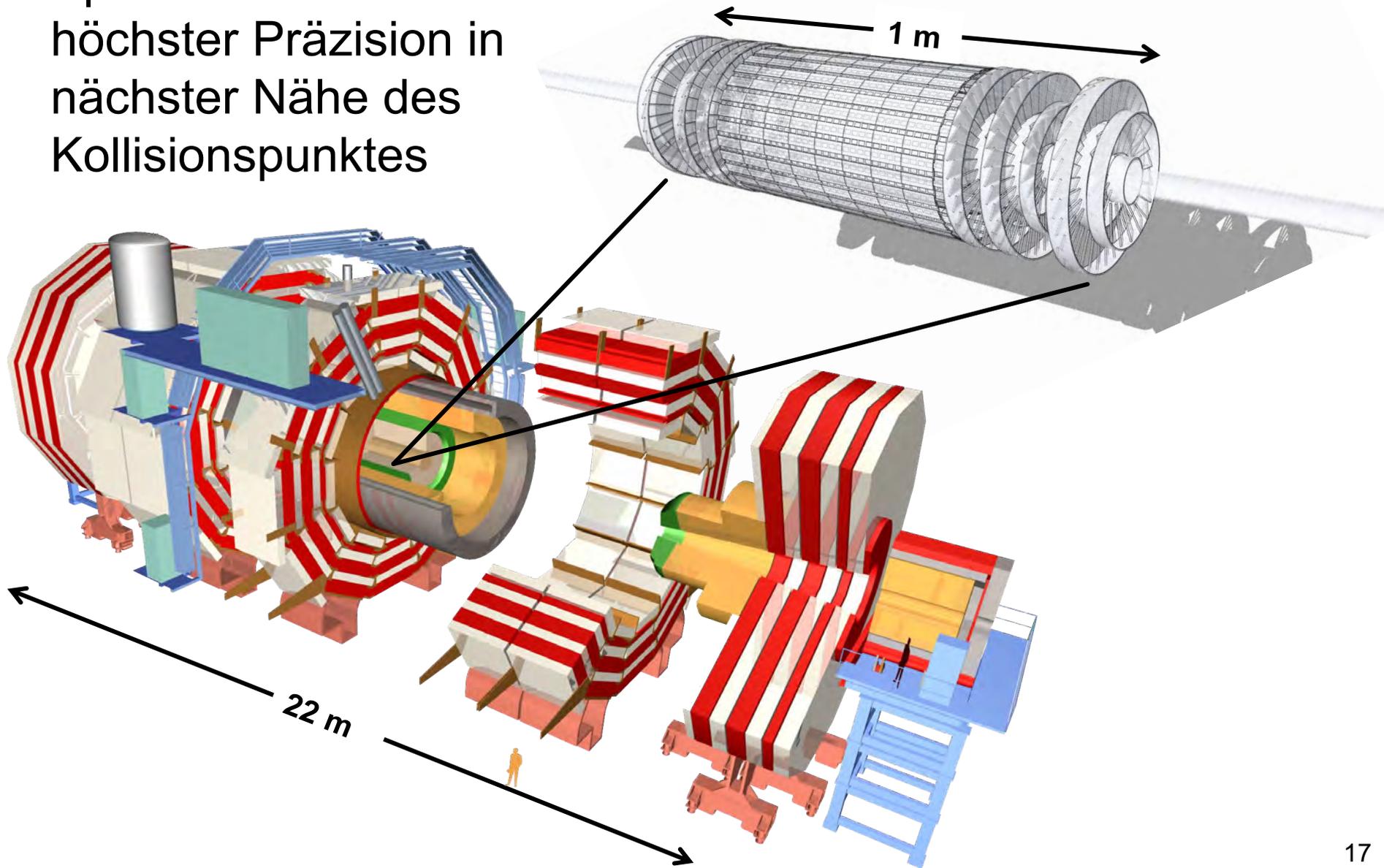
— Charged hadron (e.g. pion)

- - - Neutral hadron (e.g. neutron)

· · · Photon

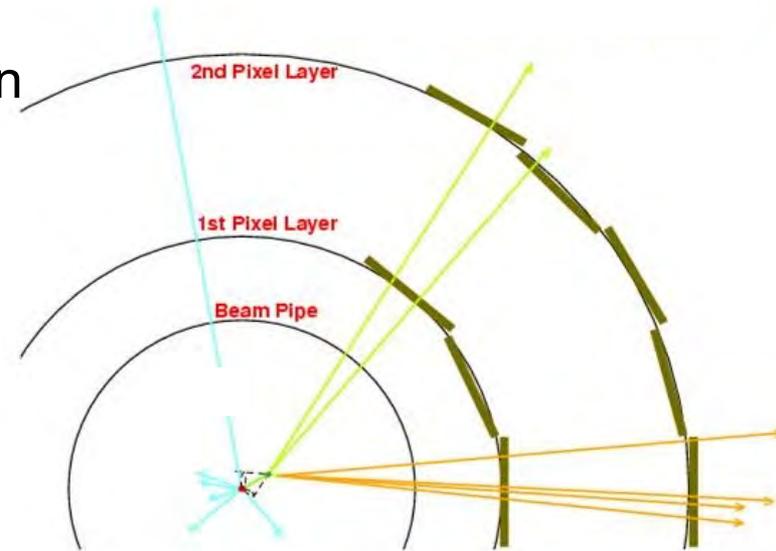
Pixeldetektor im CMS Experiment

- Spurrekonstruktion mit höchster Präzision in nächster Nähe des Kollisionpunktes



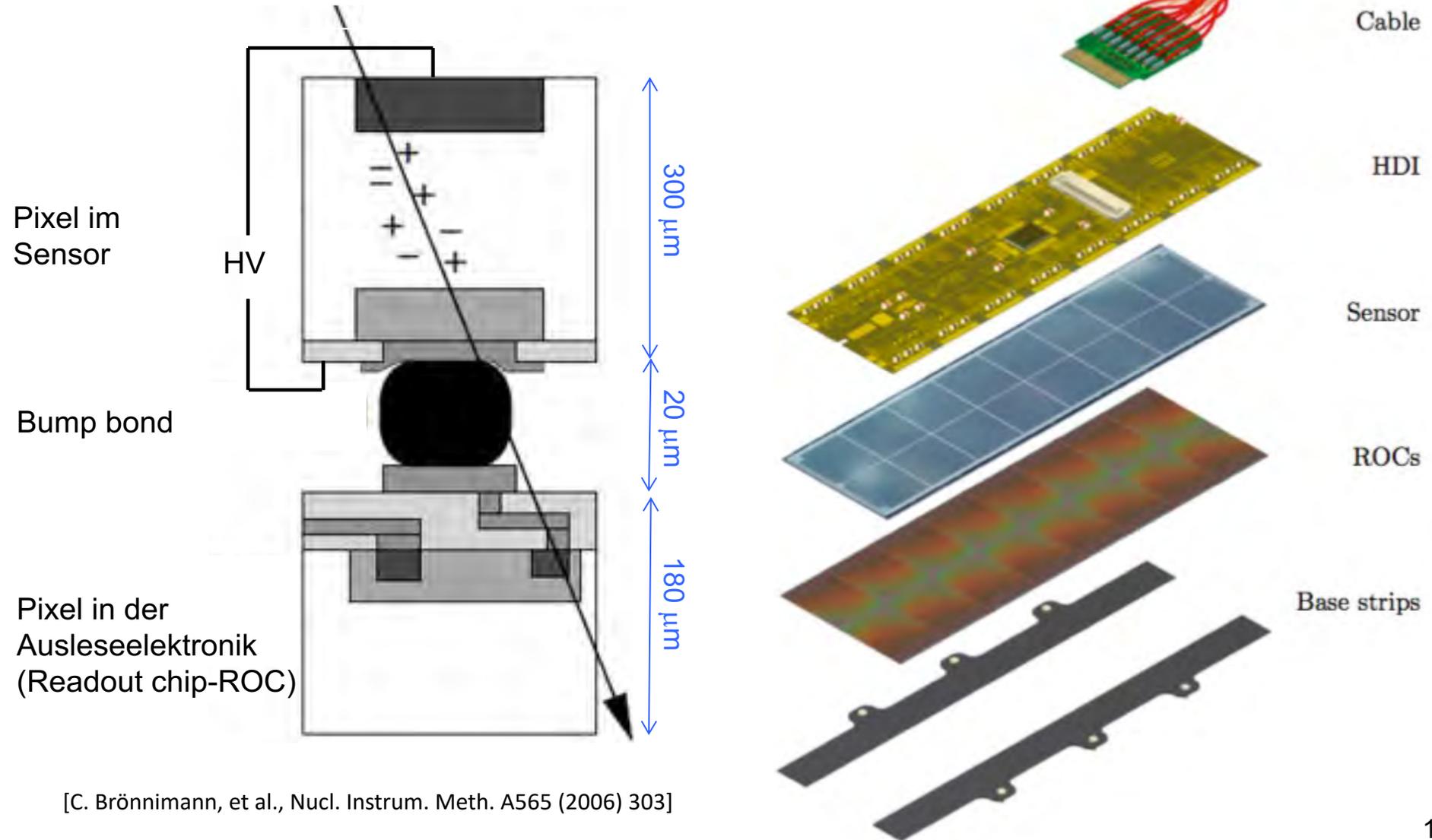
Eigenschaften des CMS Pixeldetektors

- **Schnelle Aufzeichnung und Auslese**
 - Hohe Kollisionsrate (40 MHz) und hohe Triggerrate (100 kHz)
- **Hohe Granularität**
 - Rekonstruktion von mehr als 600 Spuren pro Ereignis
- **Hohe Effizienz (>99%)**
 - Seeding für Spurrekonstruktion
- **Hohe Ortsauflösung ($\sim 10\mu\text{m}$)**
 - Rekonstruktion von Primär- und Sekundärvertices
- **Hohe Strahlenhärte**
 - Bis zu 100 Mrad in der innersten Lage
- **Leichte Bauweise**
 - Minimiert Mehrfachstreuung



Grundprinzip des Pixeldetektors

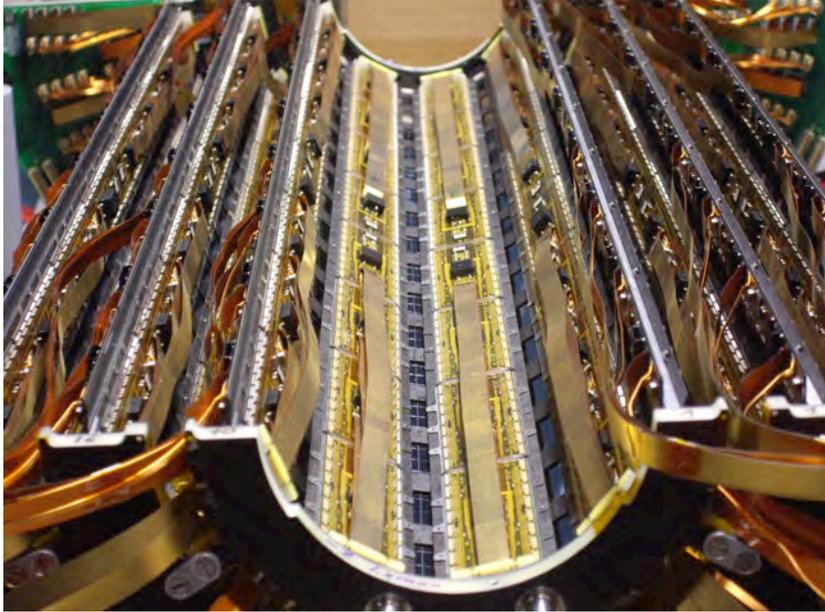
- Hybrid Technologie



CMS Silizium Pixeldetektor

Design und gebaut vom
CMS CH Consortium
(PSI, ETH, UZH)

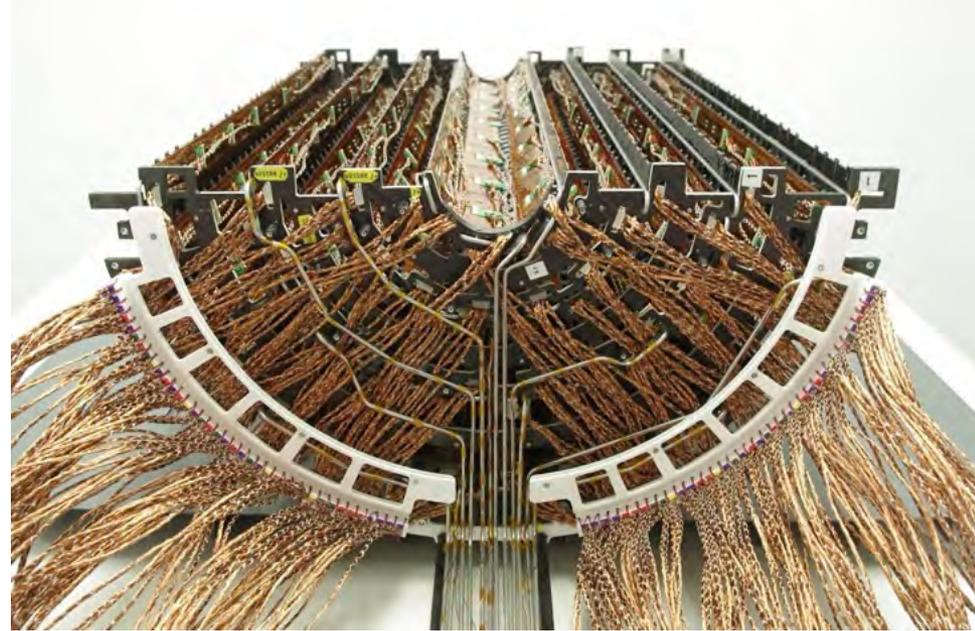
Erster Detektor @PSI 2008
In Betrieb in CMS 2010-2016



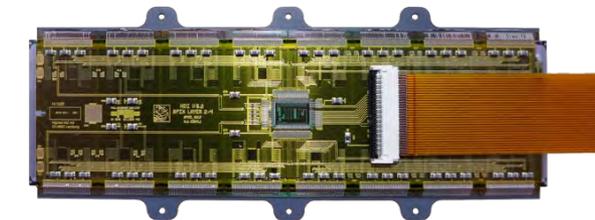
1440 Module
66 M Pixel



Phase-1 Upgrade @PSI 2017
In Betrieb in CMS 2017-2024



1856 Module
124 M Pixel

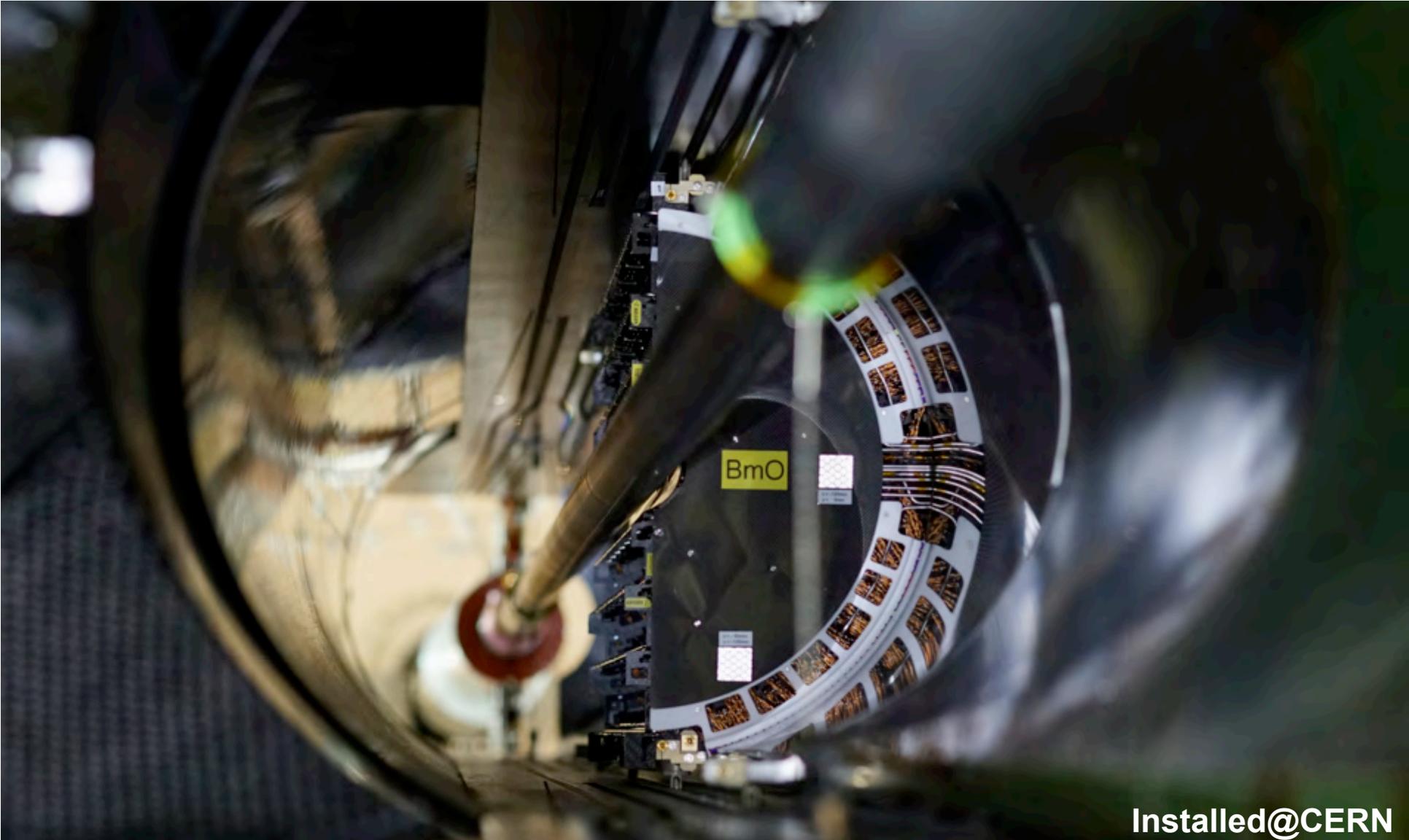


Pixelgrösse: $100 \times 150 \mu\text{m}^2$

Installation des Pixeldetektors am CERN

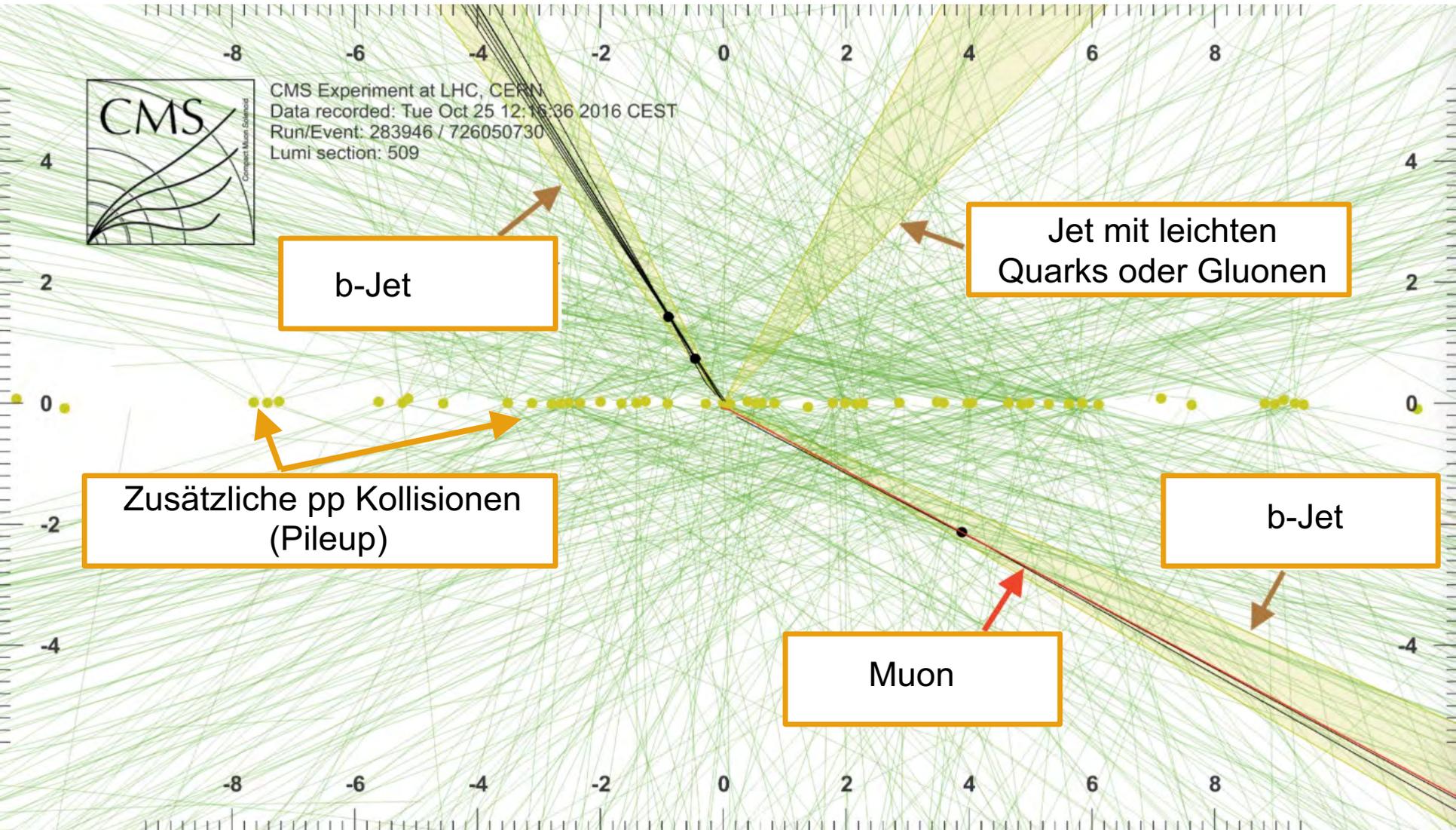


Pixeldetektor im CMS Experiment



Installed@CERN

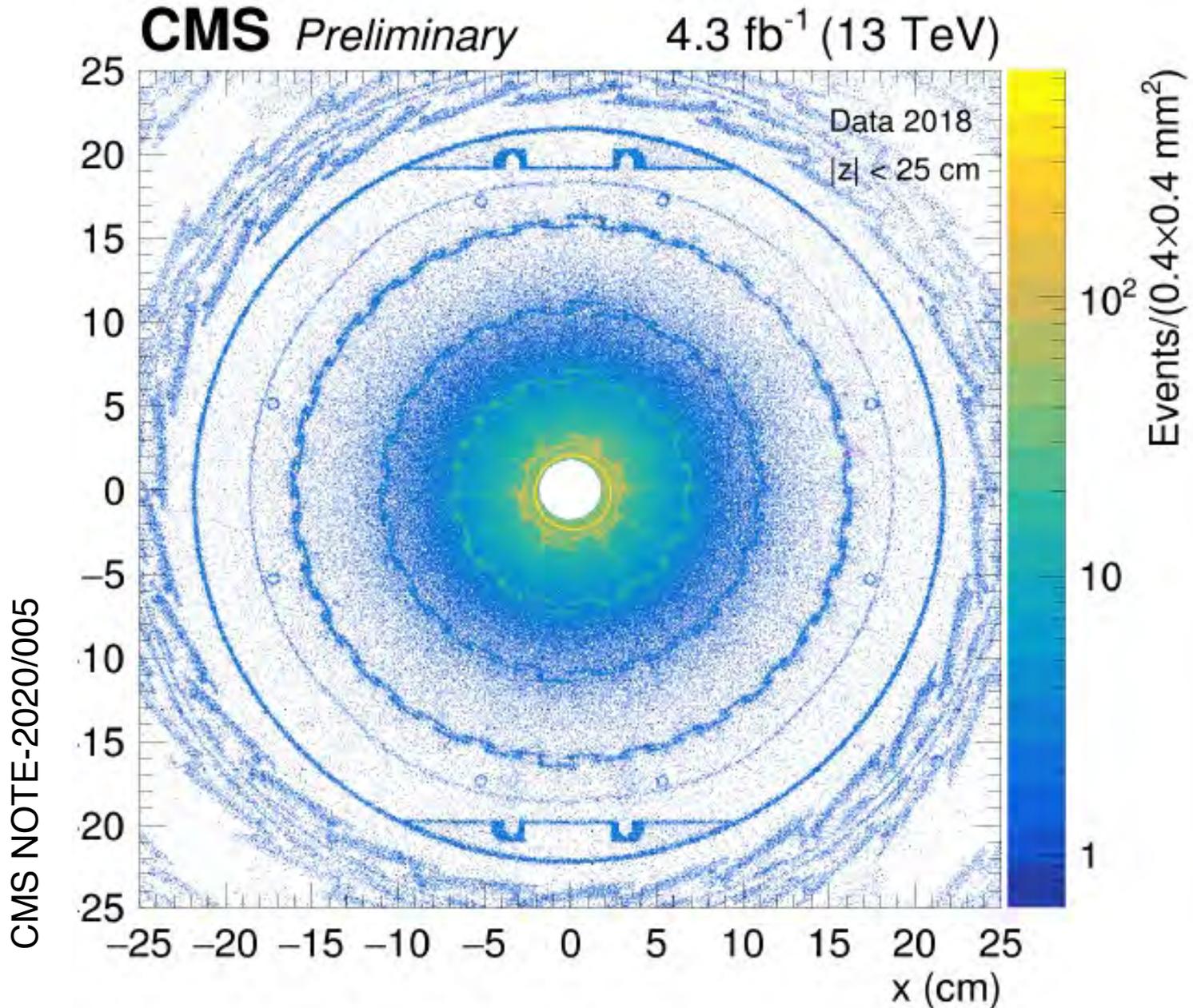
Ein rekonstruiertes Ereignis



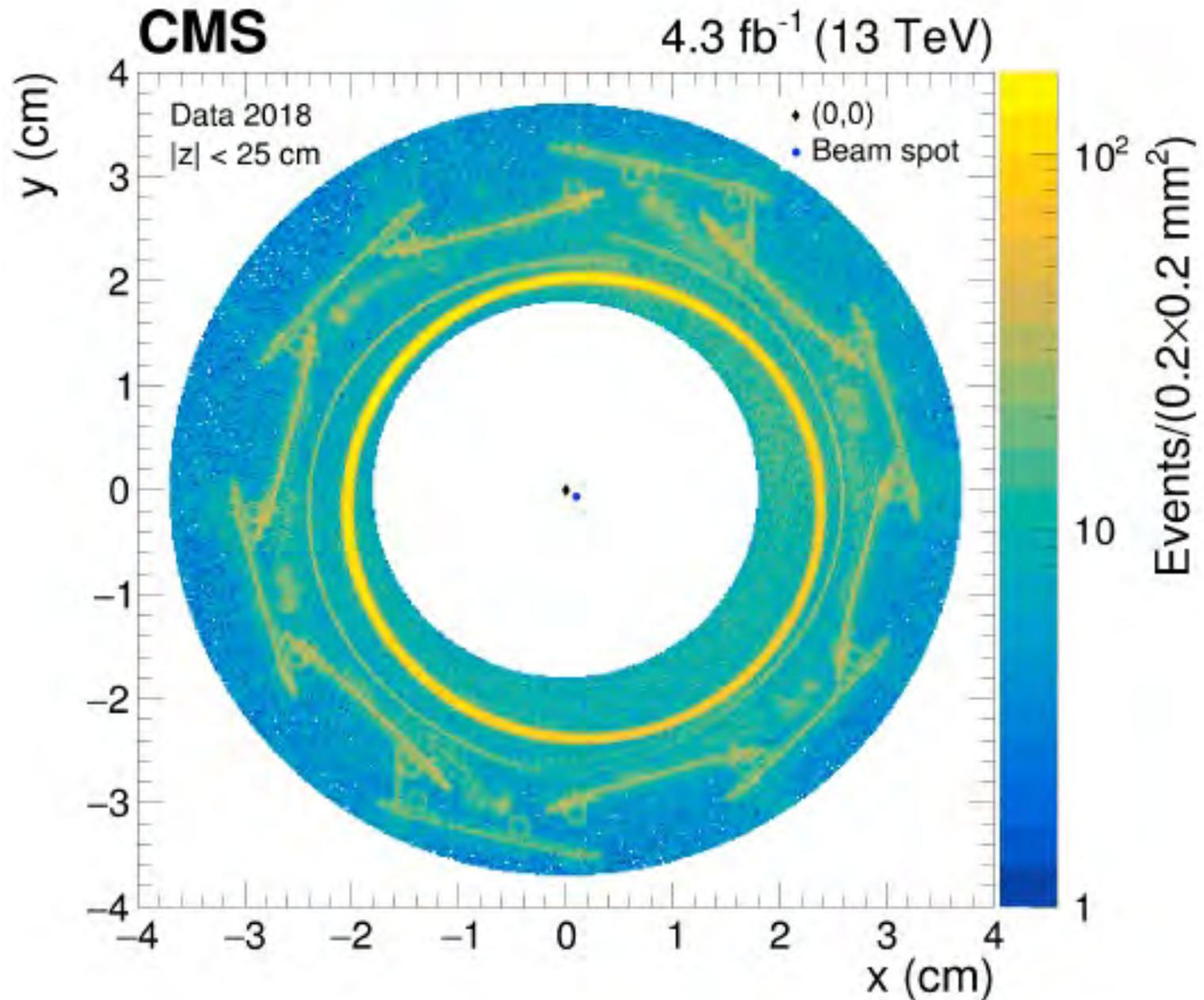
Anzahl Pileup ist proportional zur Luminosität...

Einheiten in cm

Pixeldetektor im Betrieb

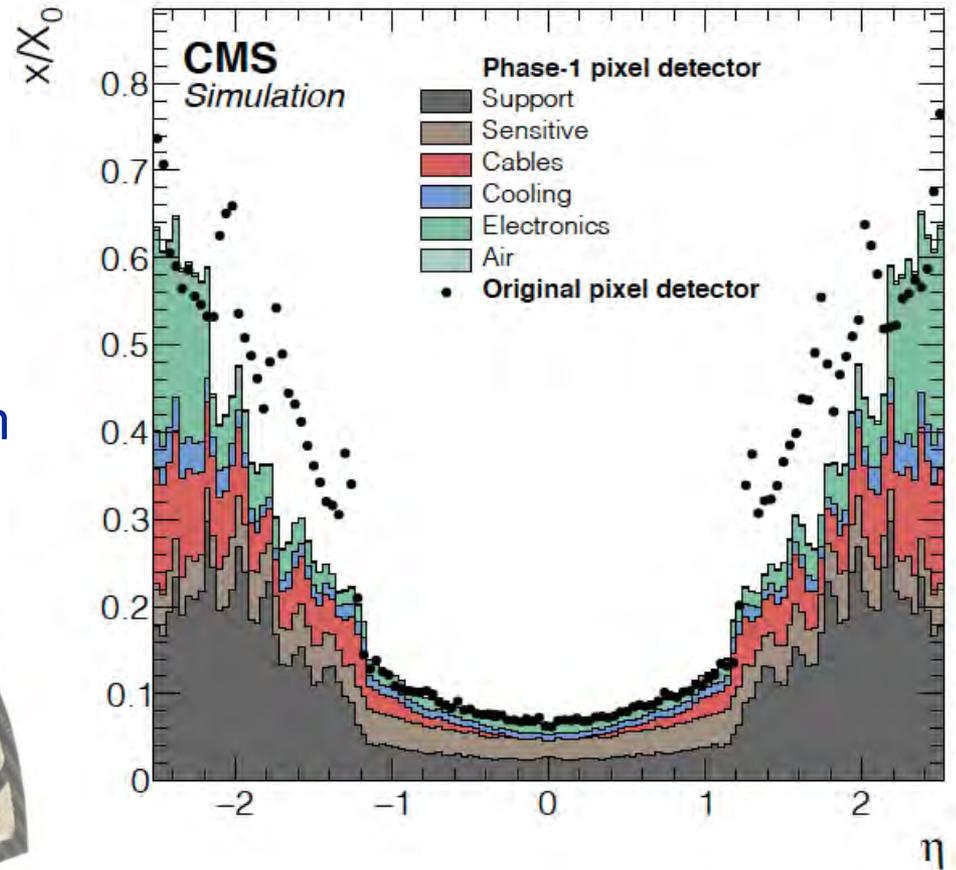
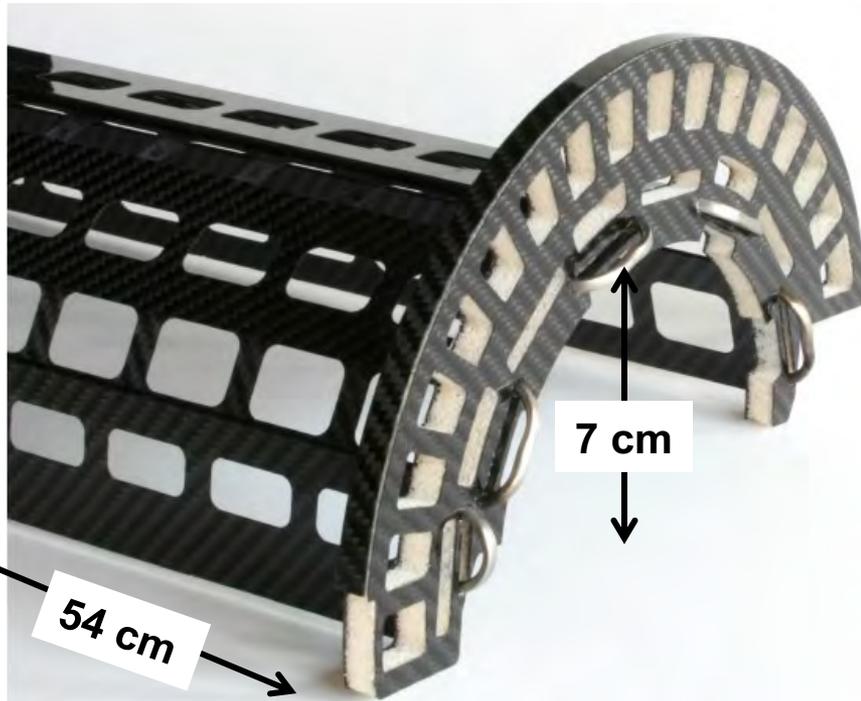


Pixeldetektor im Betrieb



Materialkomposition

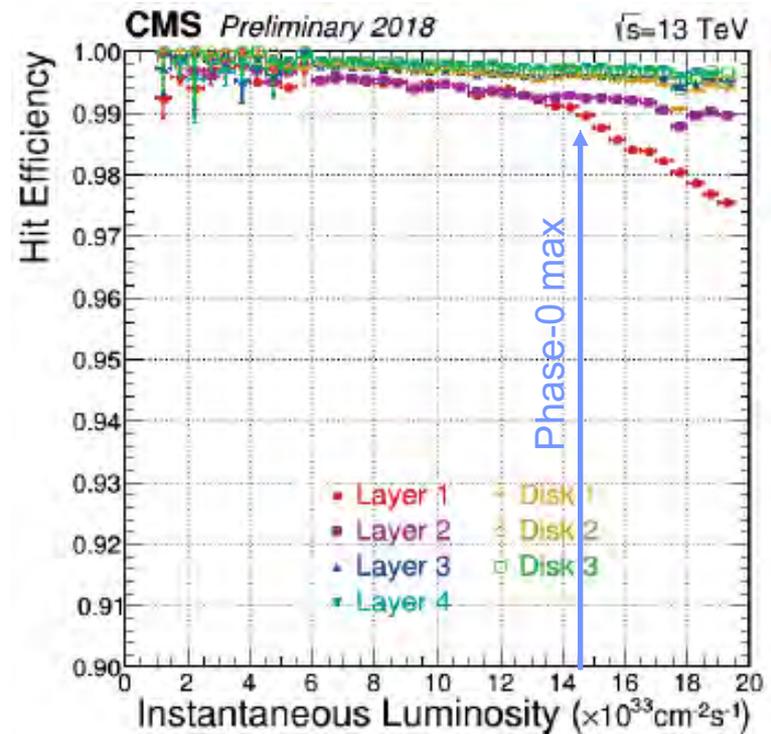
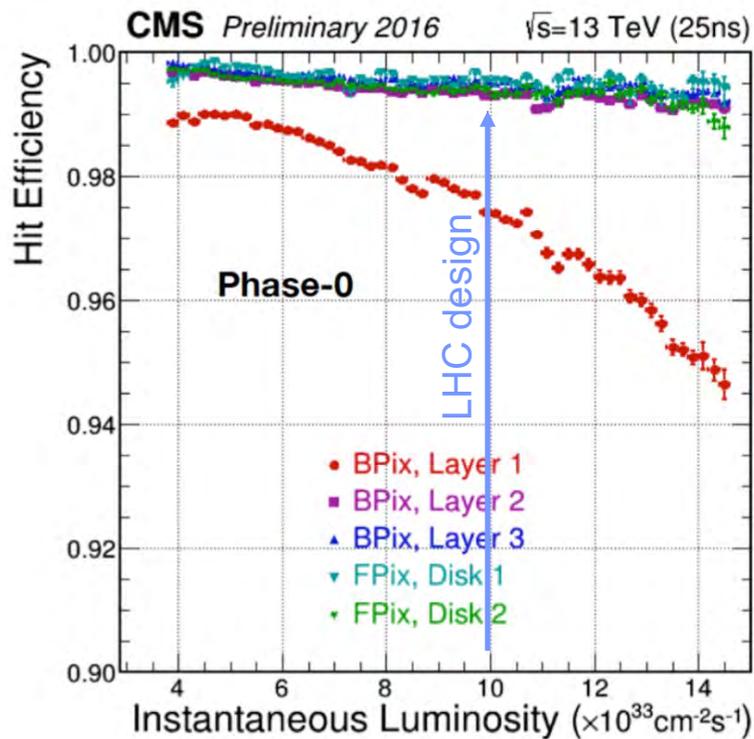
- Detektormechanik in Leichtbauweise
 - CFK Laminat (500 μ m dünn)
 - CO₂ Kühlung in Aluminiumröhrchen mit 50 μ m Wandstärke



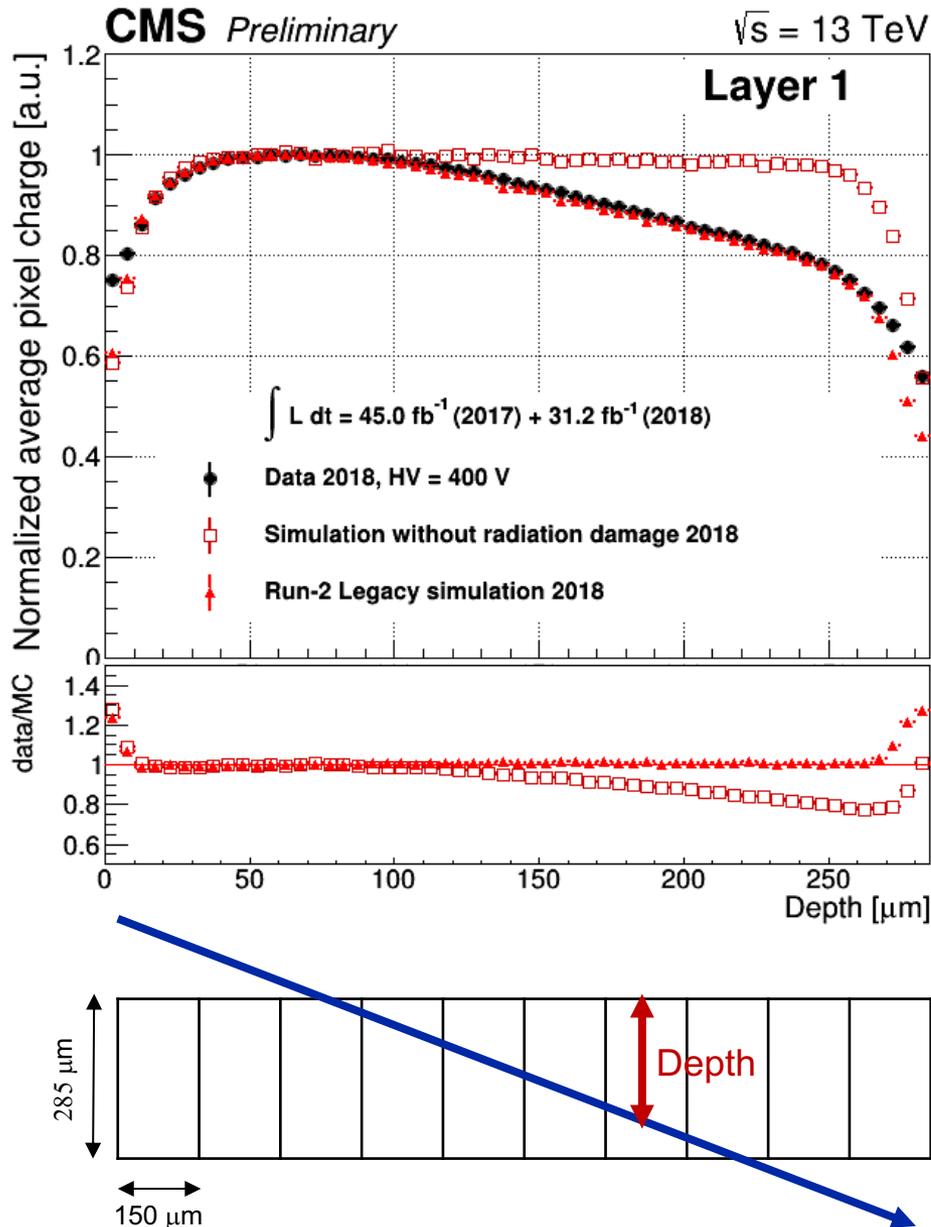
L2 Mechanik mit Kühlrohren wiegt weniger als 200g

Effizienz

- Effizienz gemessen als Funktion der Luminosität
- Höhere Raten in inneren Lagen bei gleicher Luminosität
- Grosse Verbesserung in allen Lagen im Phase-1 Detektor im Vergleich zum ursprünglichen Detektor



Strahlenhärte

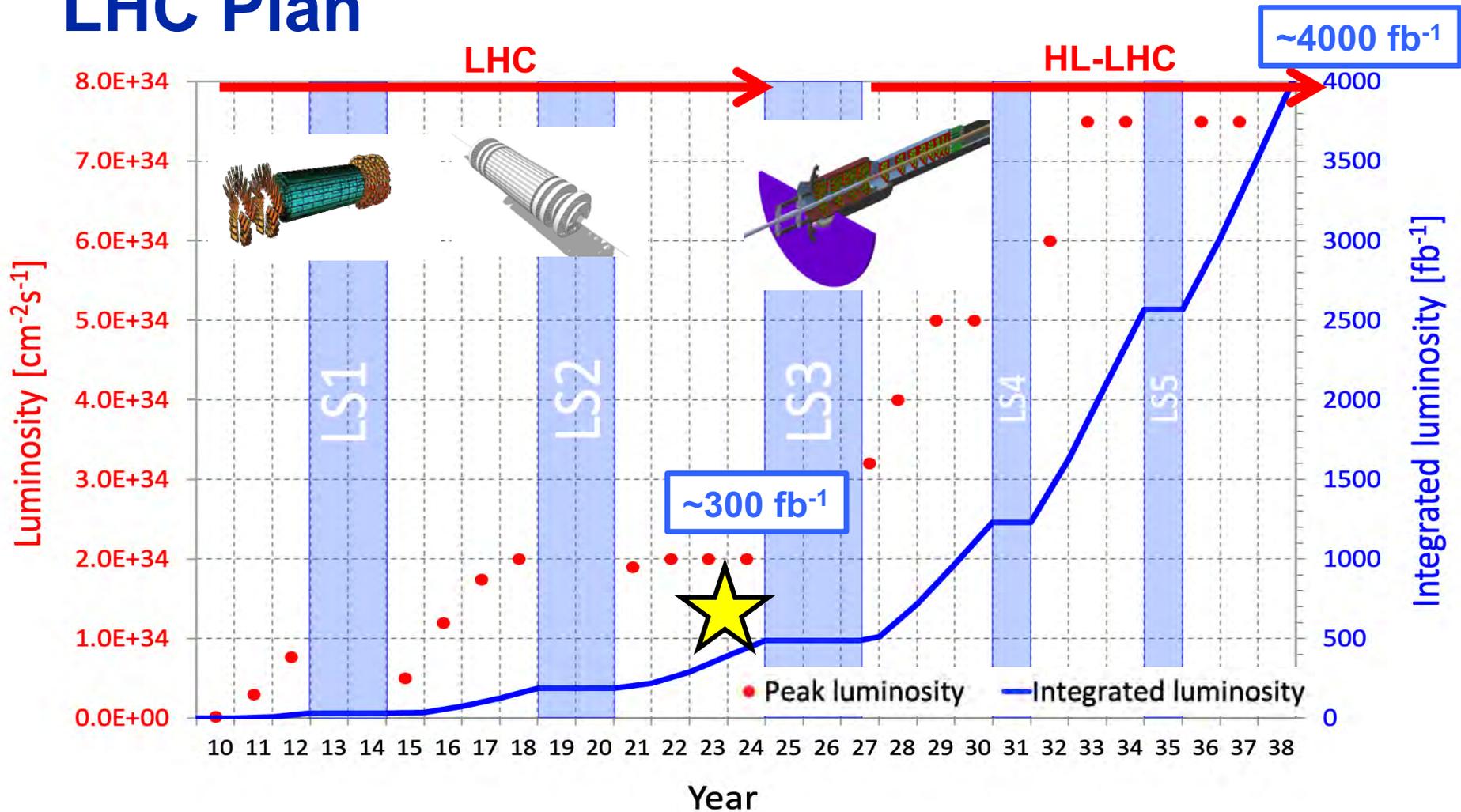


- Nicht-ionisierende Strahlung führt zu Defekten in der Kristallstruktur des Siliziums
- «Charge trapping»: Einfangen von Ladungsträgern → Verlust von Signalladung
- Effekt grösser für grössere Tiefen → **Asymmetrischer Verlust der Signalladung nach Bestrahlung**
- Gemessen mit schräg einfallenden Spuren

→ Muss bei der Rekonstruktion berücksichtigt werden, um Einfluss auf Auflösung zu minimieren

→ Kann teilweise kompensiert werden (HV, thermisch), aber limitiert Lebensdauer

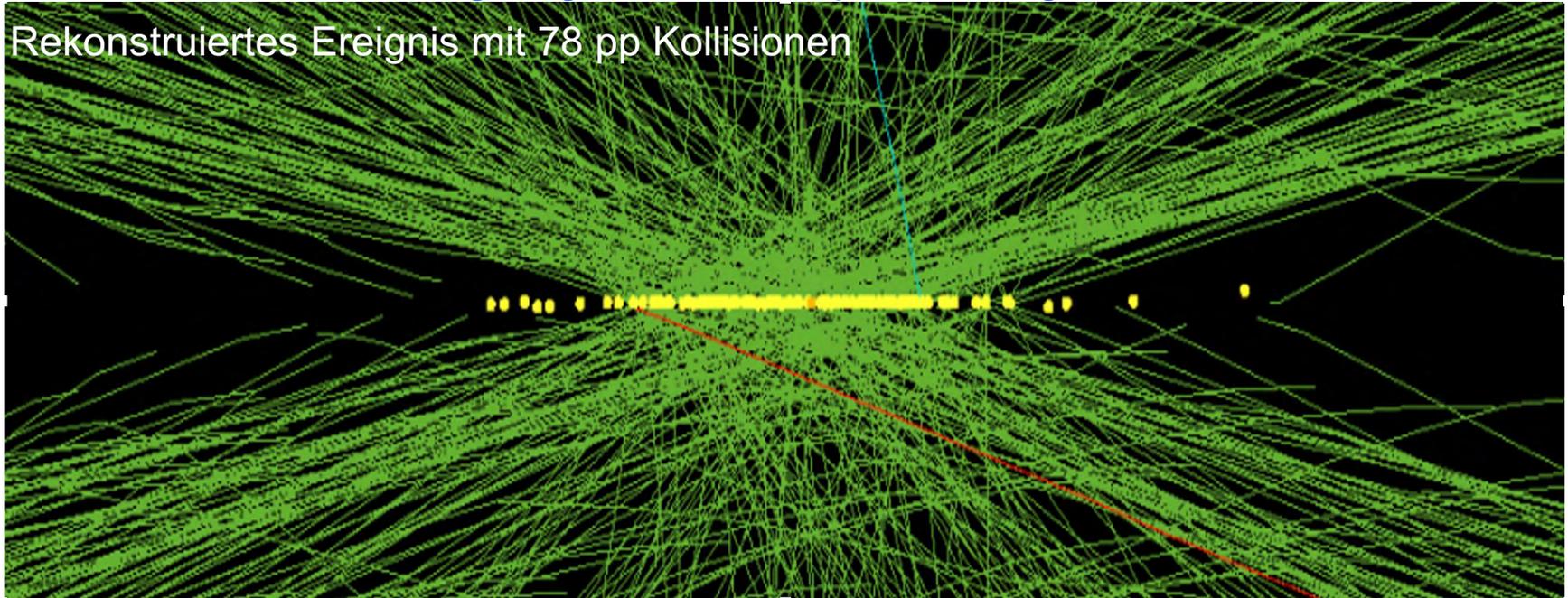
LHC Plan



- Weitere Upgrades des Pixeldetektors geplant

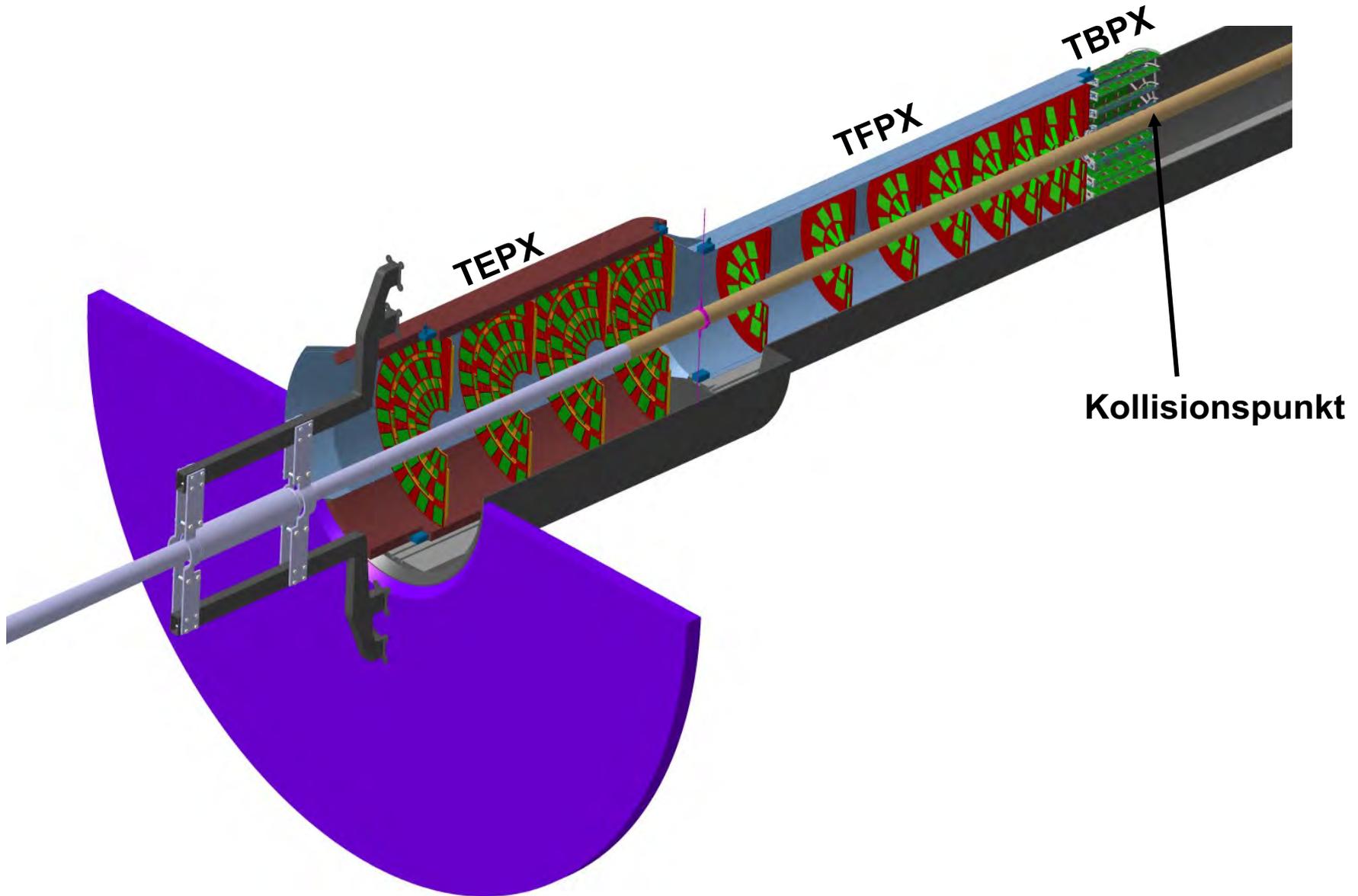
Experimentelle Herausforderungen am HL-LHC

- Ereignisse mit Pileup bis zu 200
- Hauptziele des Detektordesigns
 - Leistungsfähigkeit bei höheren Raten bis zu 3 GHz/cm² (x5 mehr)
 - Strahlungshärte bis zu 1GRad (x10 mehr)
 - Bewältigung des hohen Pileup (bis zu 1000 Spuren/Ereignis) → höhere Granularität und Ortsauflösung
 - Grössere Abdeckung → grössere Akzeptanz und grössere Präzision



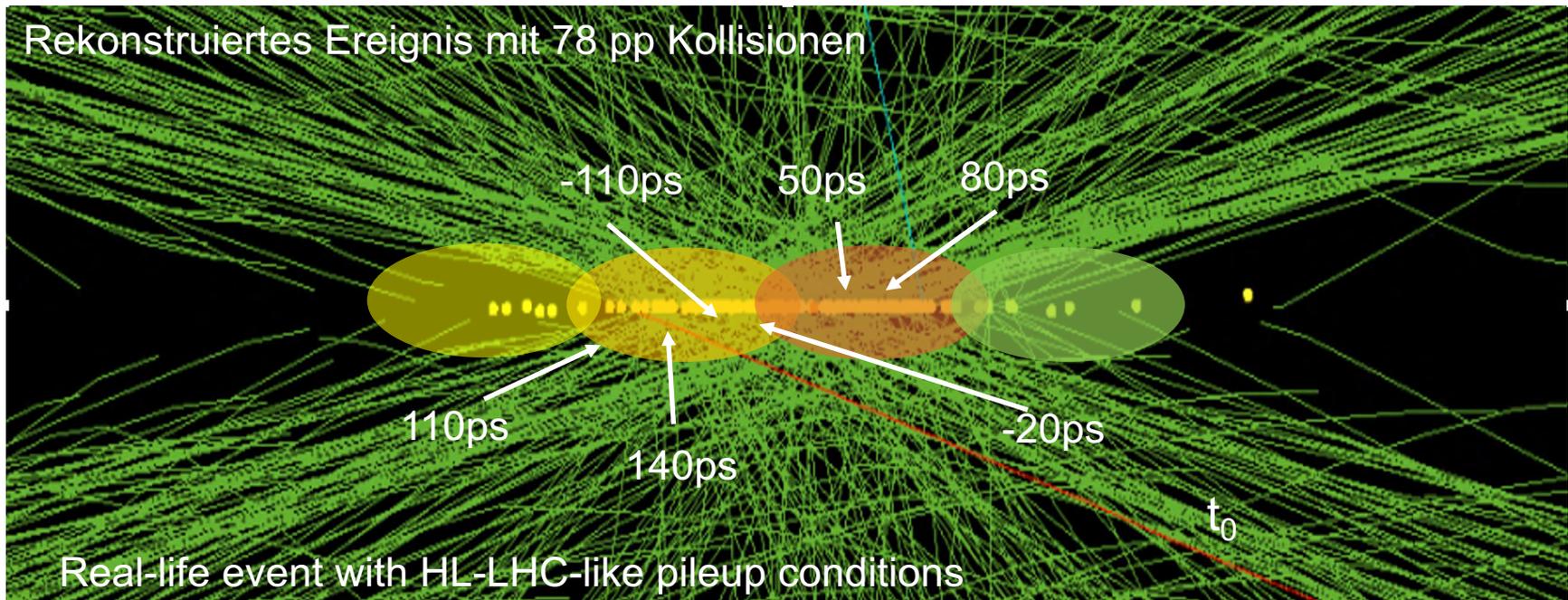
Pixeldetektor für High-Luminosity LHC

Ein Viertel des CMS Pixeldetektors für HL-LHC (Phase 2)



Zeitauflösung – eine zusätzliche Dimension

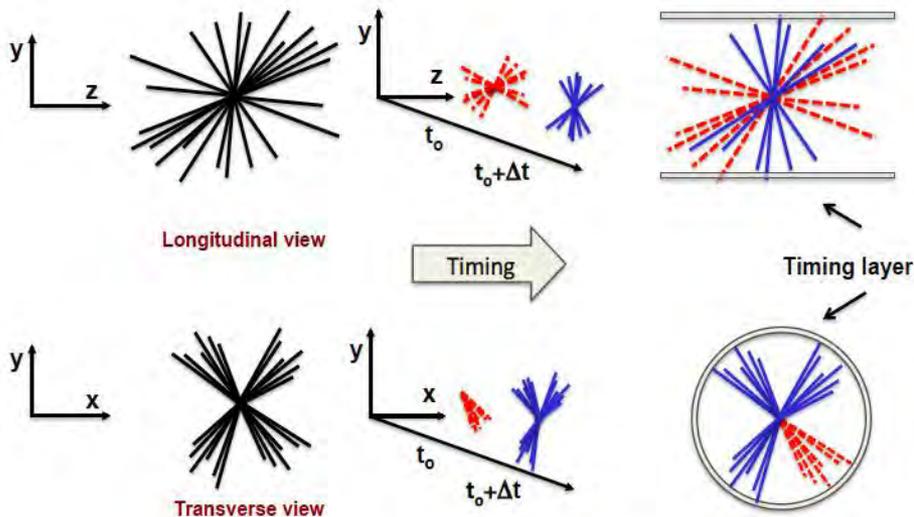
- Pileup 200 \rightarrow 2 Primärvertices pro mm
 - Zeitspanne einer Kollision ist etwa 200 ps
 - Idee: Aufteilung der Kollision in Zeitfenster von etwa 30 ps erlaubt die Anzahl von Primärvertices pro mm auf jetziges Niveau zu reduzieren
- \rightarrow Brauchen Detektoren mit entsprechender Zeitauflösung



4D Tracking

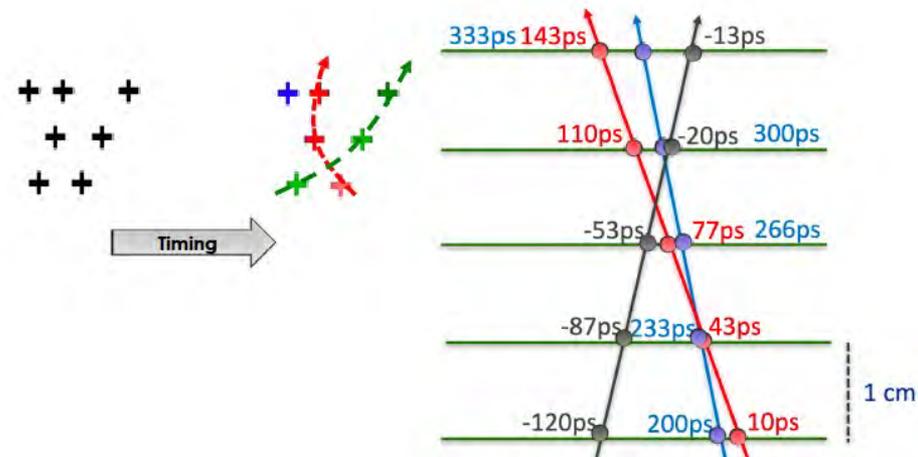
Erster Schritt:

Zeitauflösung durch zusätzliche Detektoren mit weniger Granularität
Erlaubt die Separierung von räumlich überlappenden Ereignissen



Zweiter Schritt:

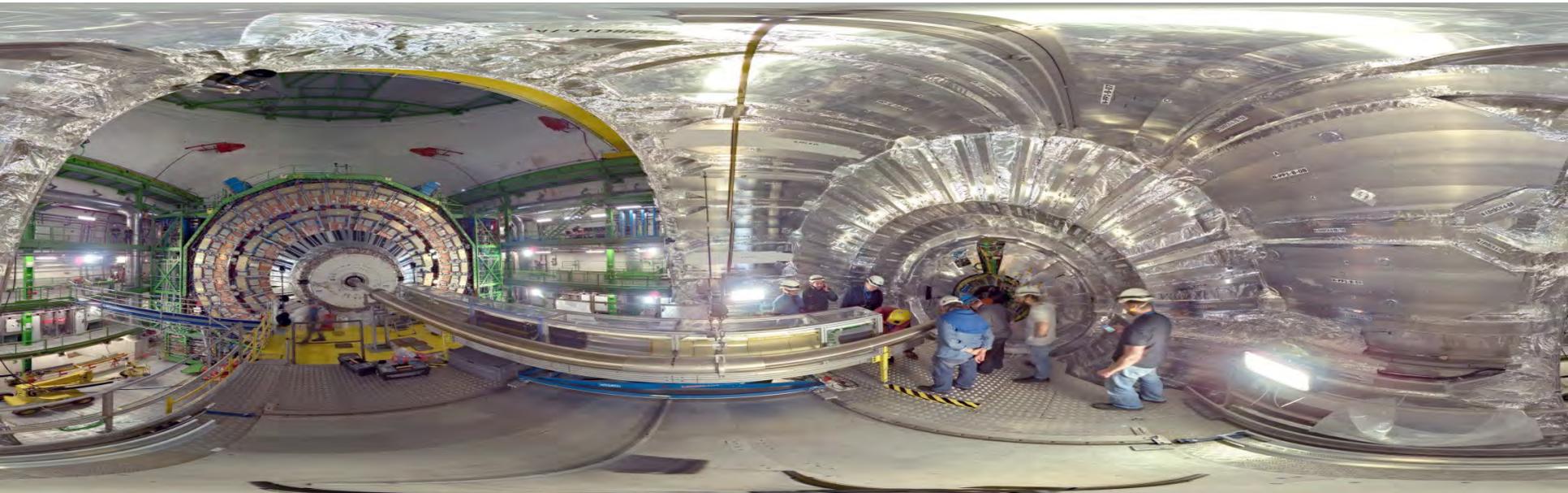
Zeitauflösung in den einzelnen Lagen der Spurdetektoren
Zeitinformation kann in der Spurrekonstruktion benutzt werden



→ R&D für Pixeldetektoren mit Zeitauflösung < 50 ps

Abschluss und Ausblick

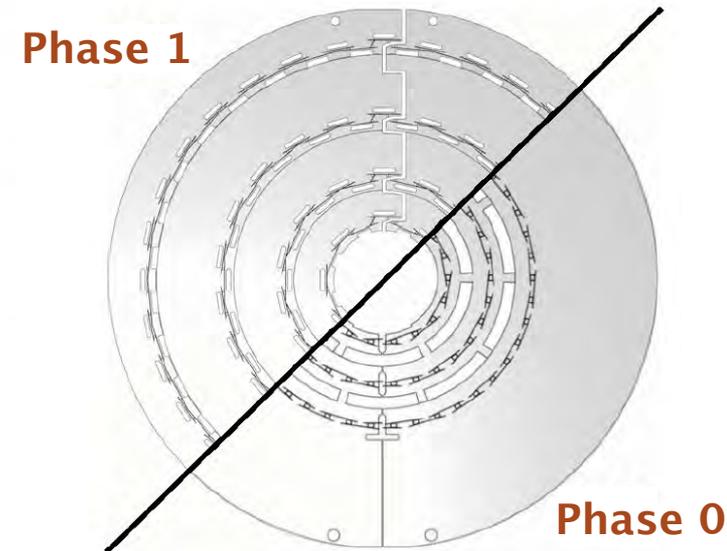
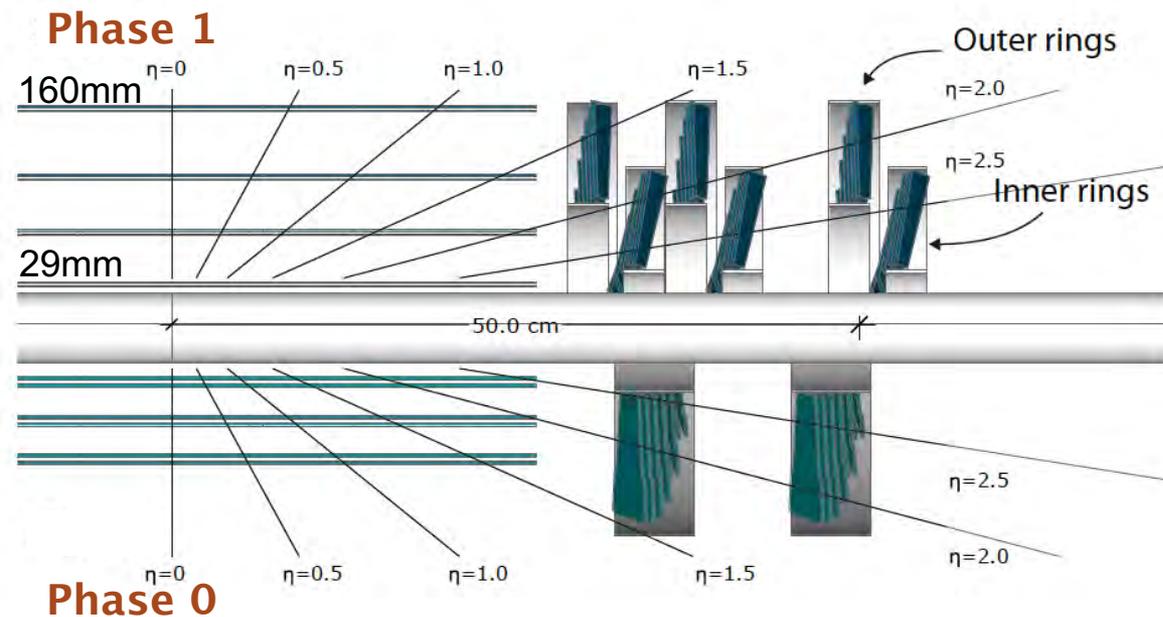
- Die Experimente am LHC ermöglichen viele neue Messungen und Resultate zur Gültigkeit des Standardmodells der Teilchenphysik und (vielleicht) darüber hinaus
- LHC Run 3 ist in vollem Gange
- Vielseitige Neuerungen im Bereich der Detektorentwicklung und der Rekonstruktions- und Analysetechniken treiben die Suche nach neuer Physik voran



Backup

Phase-1 Upgrade des CMS Pixeldetektors

- Anfang 2017 installiert, um die Leistungsfähigkeit des Detektors bei höherer Luminosität aufrecht zu erhalten (bis zu $2.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
- Wichtigste Neuerungen und Verbesserungen:
 - Zusätzliche Lage
 - Innerste Lage näher am Kollisionspunkt
 - Signifikant weniger Material
 - Grösseres Leistungsvermögen bei hohen Raten (neue ROCs und neues Datenauslesesystem)



CMS detector upgrade for HL-LHC

- Major upgrades needed for all subdetectors to cope with harsh conditions at HL-LHC (particle rate, multiplicity, radiation, ...)

New tracker

- Replace all silicon tracker
- Extended forward coverage up to $|\eta| < 4$

New high-granularity endcap calorimeter

New MIP precision timing detector

Trigger/DAQ

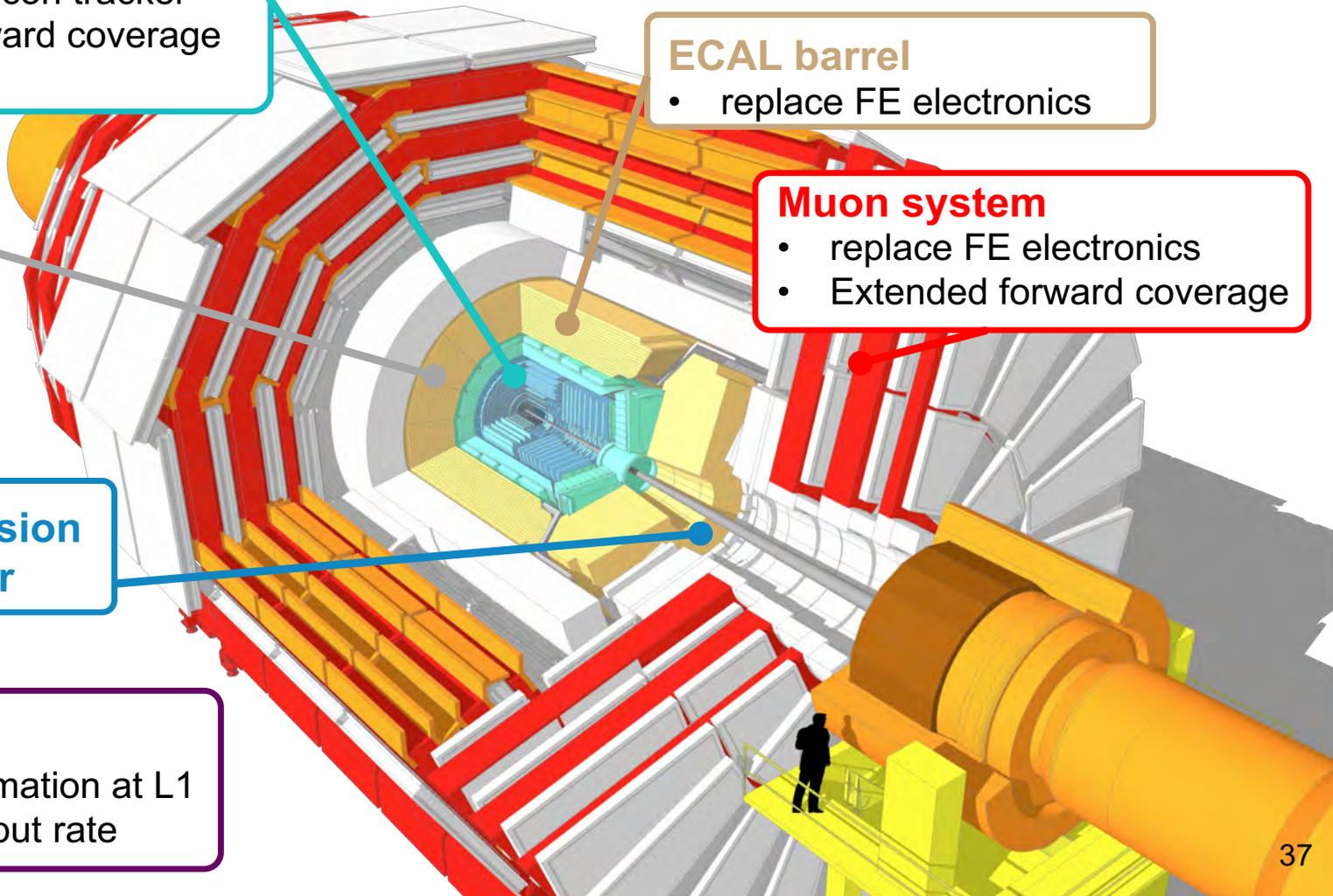
- Tracking information at L1
- Increased output rate

ECAL barrel

- replace FE electronics

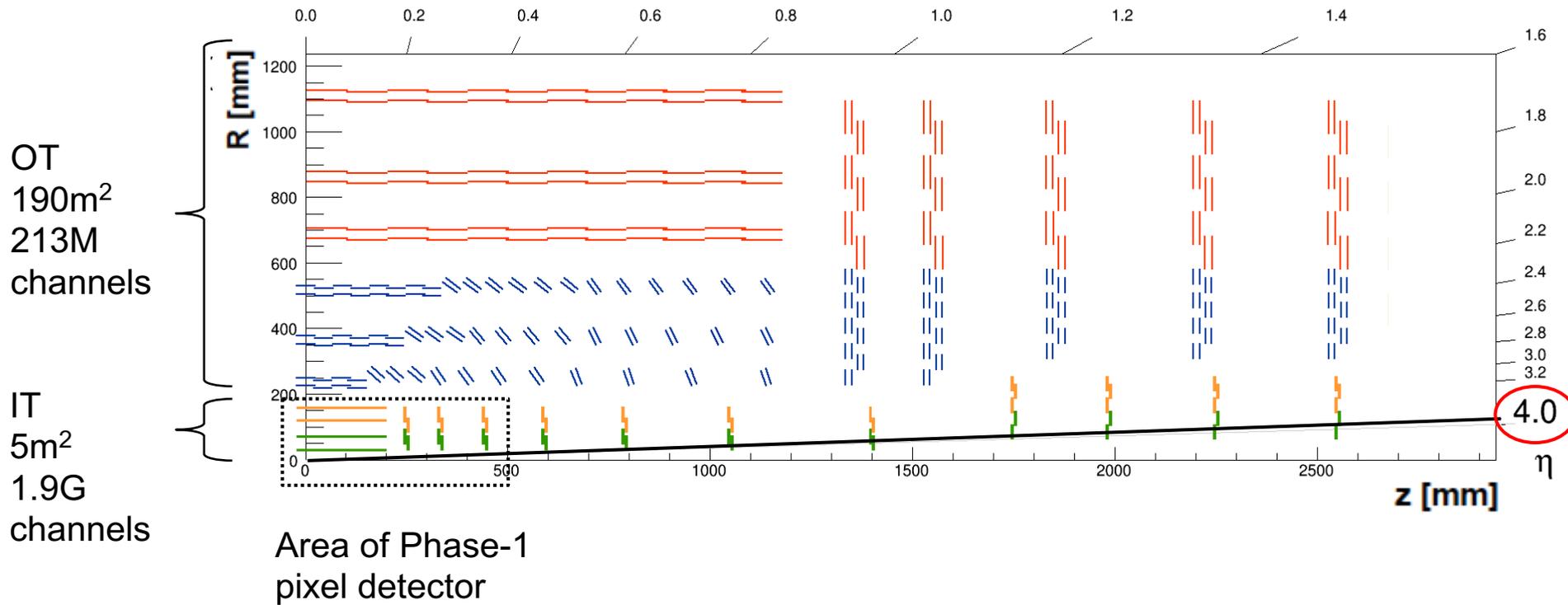
Muon system

- replace FE electronics
- Extended forward coverage



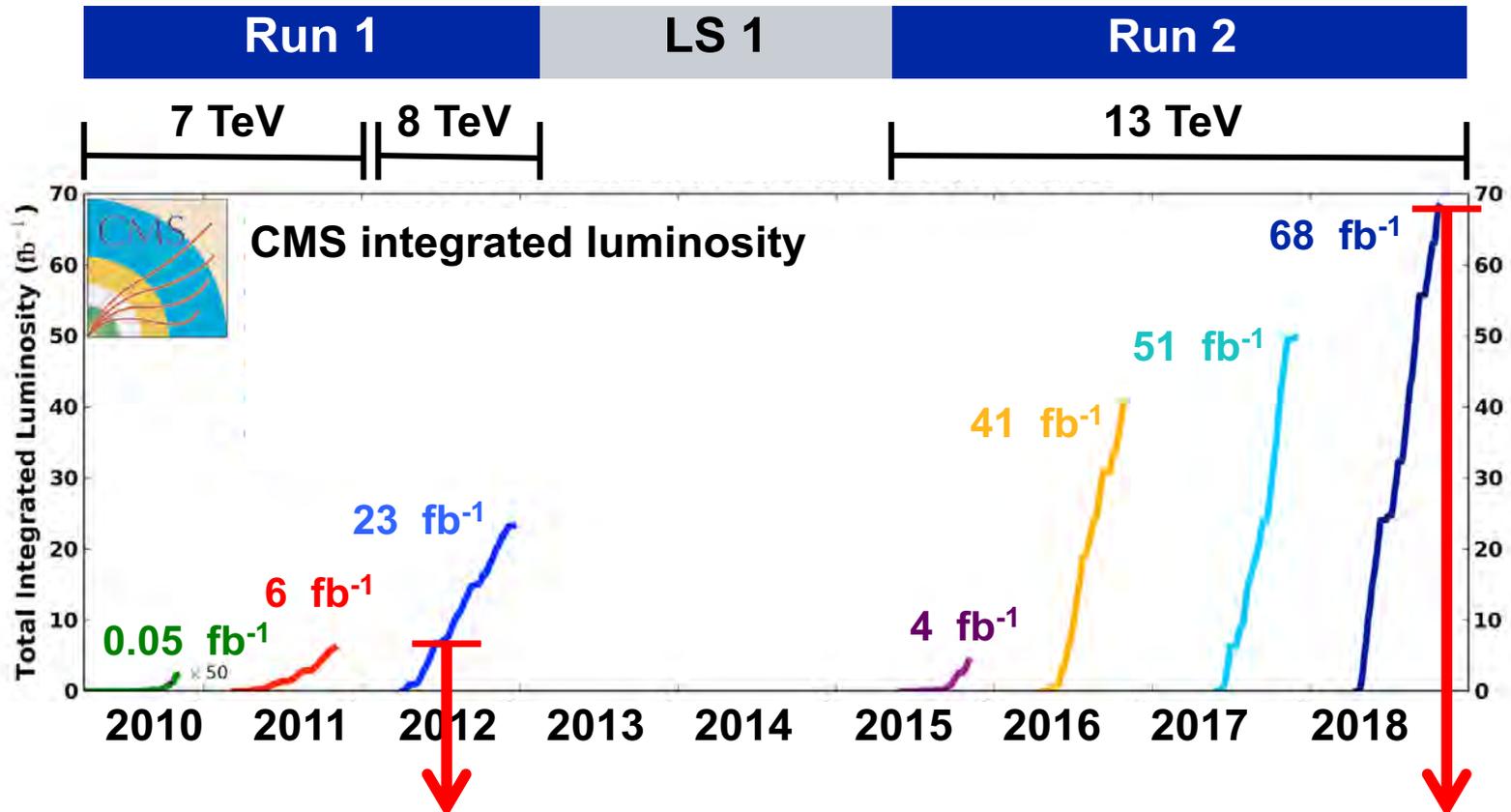
CMS Phase-2 Tracker detector

- Whole CMS silicon tracker will be replaced during LS3
 - > Outer tracker (OT): strip and pixel-strip modules
 - > Inner tracker (IT): pixels with $100 \times 25 \mu\text{m}^2$ pixel size



LHC data Run 1 and Run 2

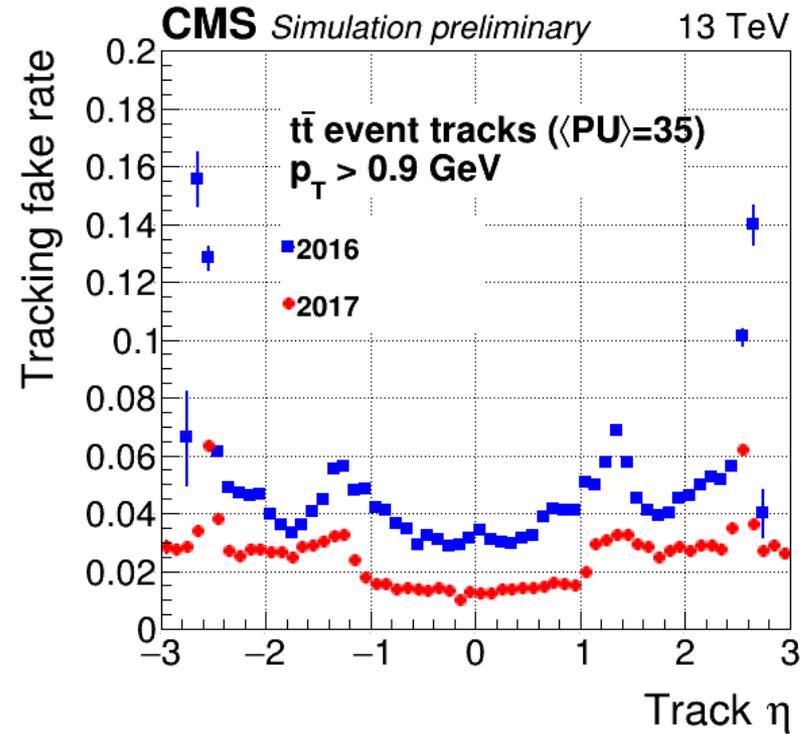
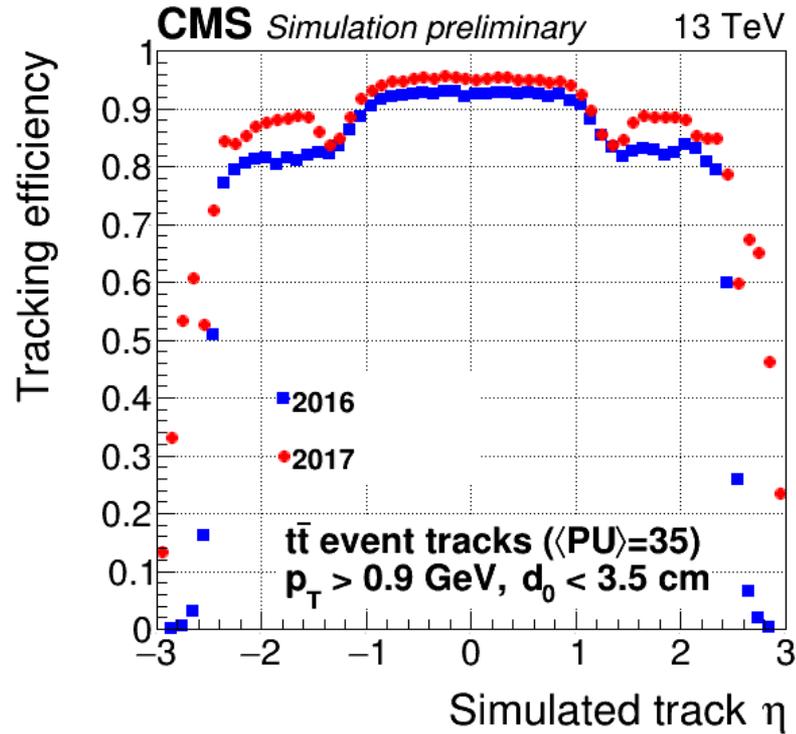
- Excellent performance of accelerator and detectors provides unique data set for physics analysis



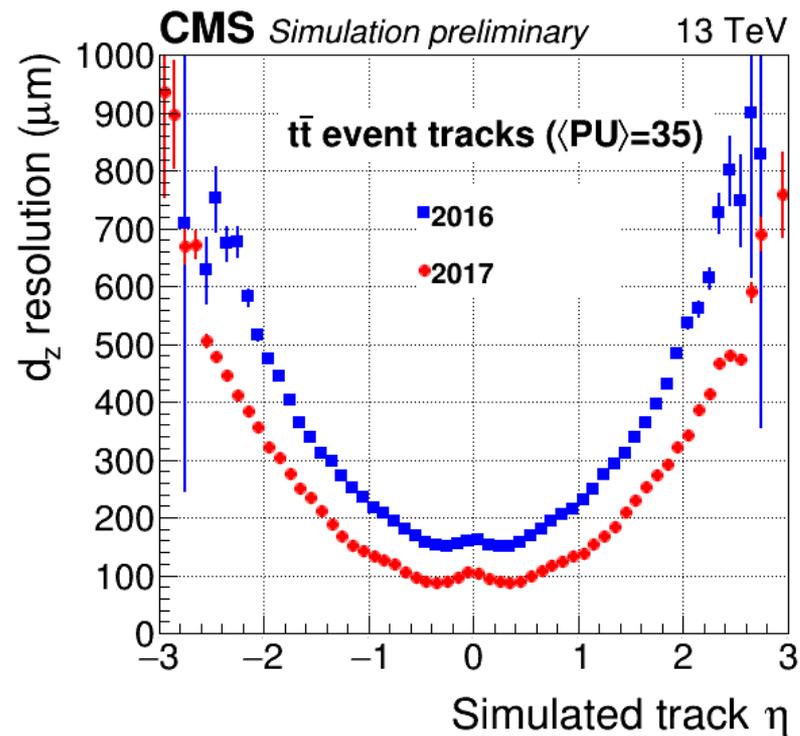
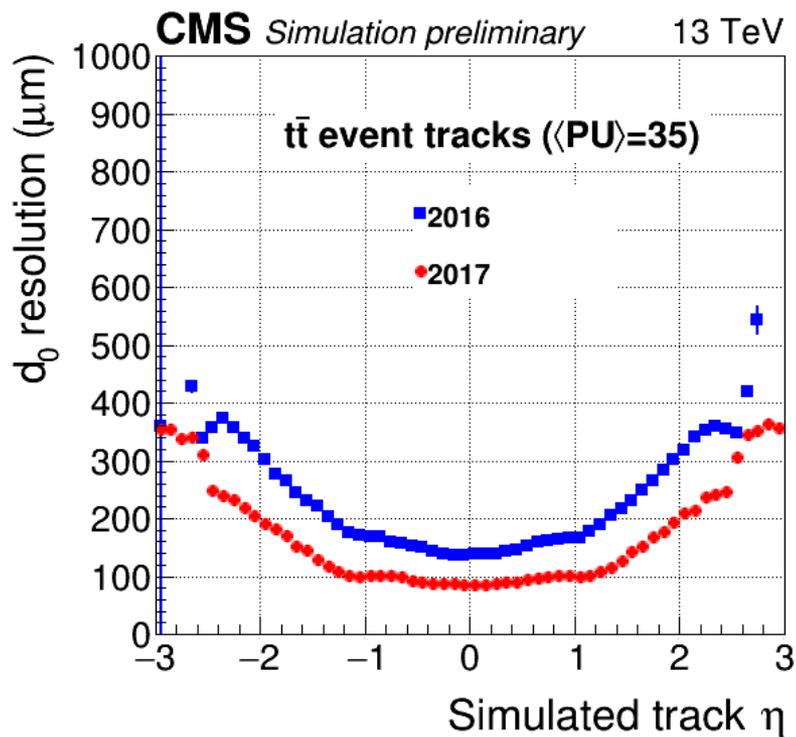
**200k Higgs bosons produced:
Higgs boson discovery (ZZ,γγ)**

**Run 2: 7M Higgs bosons produced!
Allows to study Higgs boson properties**

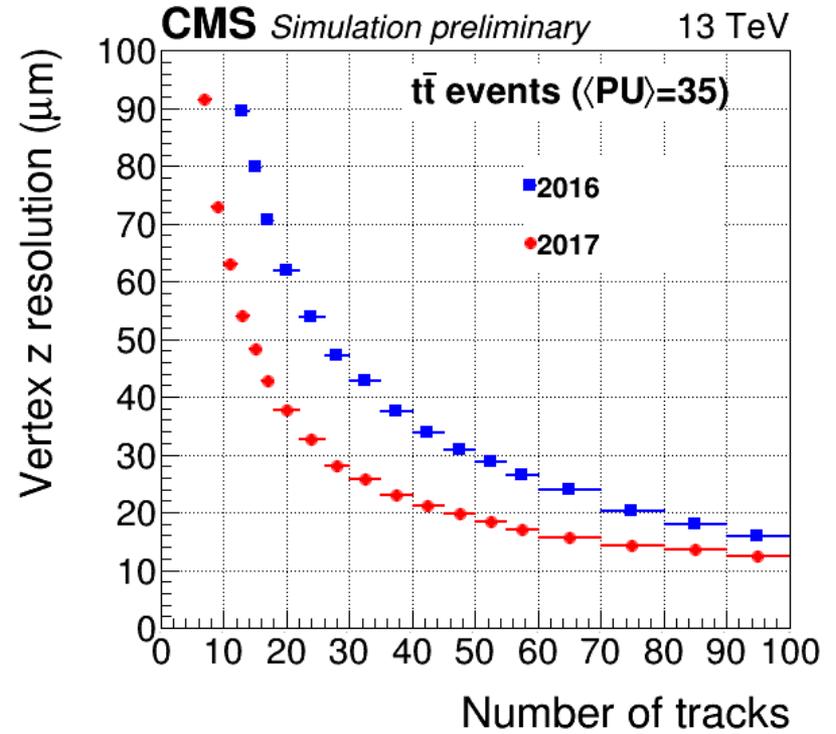
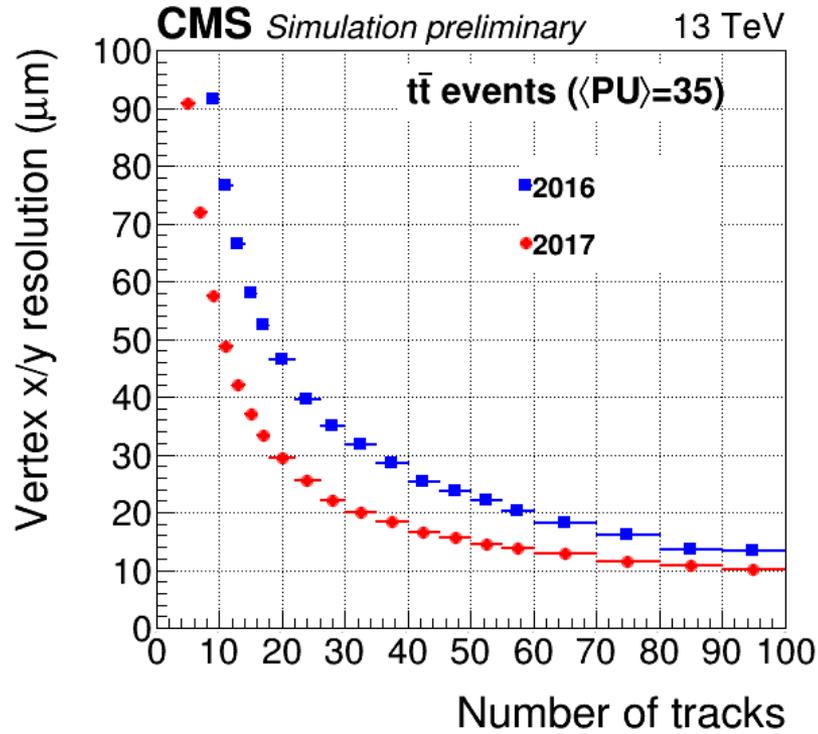
Tracking efficiency and fake rate



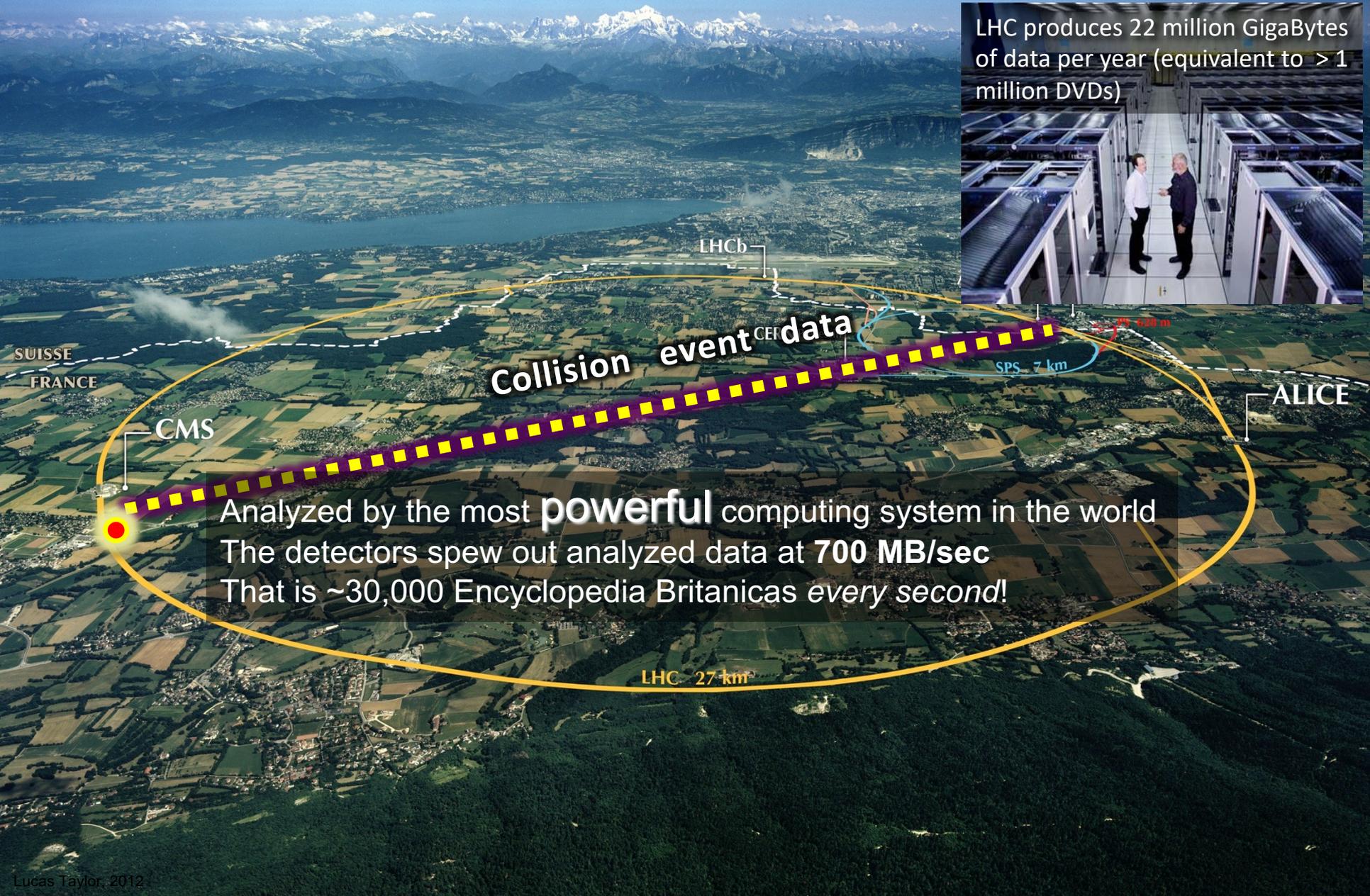
Impact parameter resolution



Vertex resolution



The Large Hadron Collider at CERN



LHC produces 22 million GigaBytes of data per year (equivalent to > 1 million DVDs)



Collision event data

Analyzed by the most **powerful** computing system in the world
The detectors spew out analyzed data at **700 MB/sec**
That is ~30,000 Encyclopaedia Britannicas every second!

SUISSE
FRANCE

CMS

LHCb

SPS 7 km

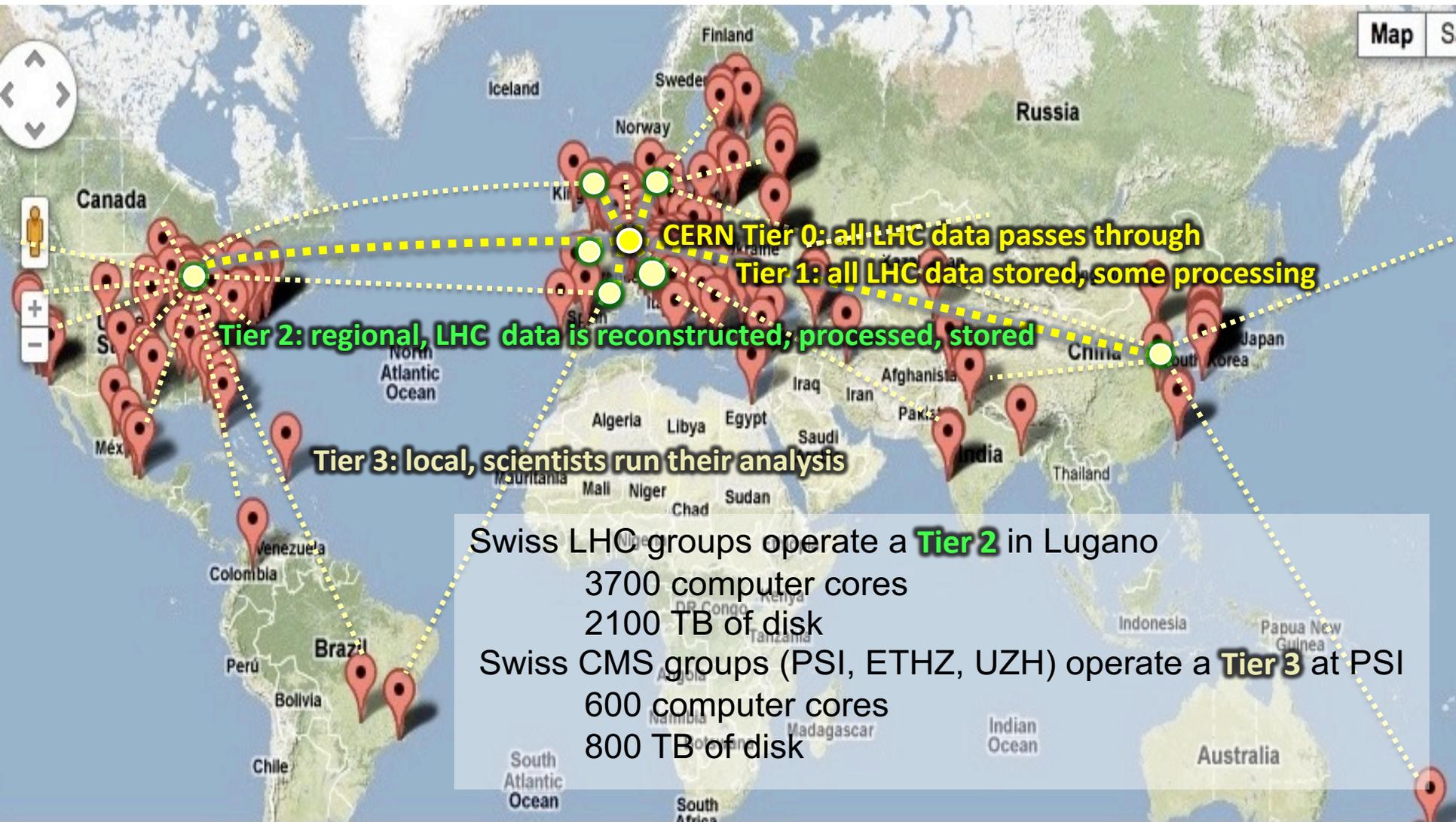
6.28 m

ALICE

LHC 27 km

The Large Hadron Collider at CERN

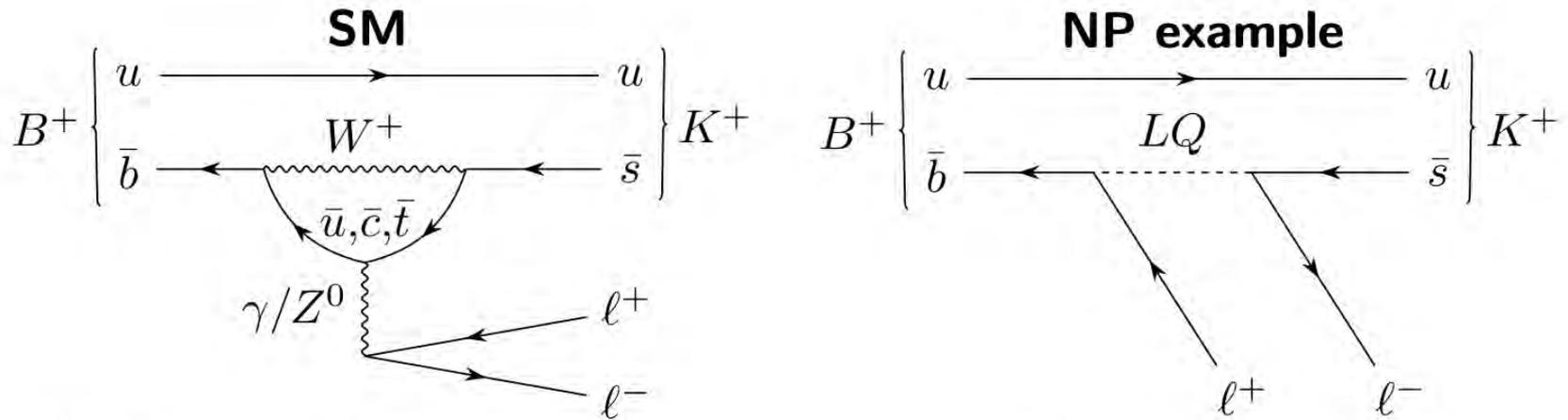
Requires very large distributed computing: 6 Peta Bytes / year per experiment



$B^+ \rightarrow K^+ l^+ l^-$ and related decays

- ▶ Occur through $b \rightarrow s l^+ l^-$ transition but in contrast to $B_s^0 \rightarrow l^+ l^-$, contain a hadron in the final state.

e.g $B^+ \rightarrow K^+ l^+ l^-$, $B^0 \rightarrow K^{*0} l^+ l^-$, $B_s \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$, $\Lambda_b \rightarrow \Lambda^* l^+ l^- \dots$

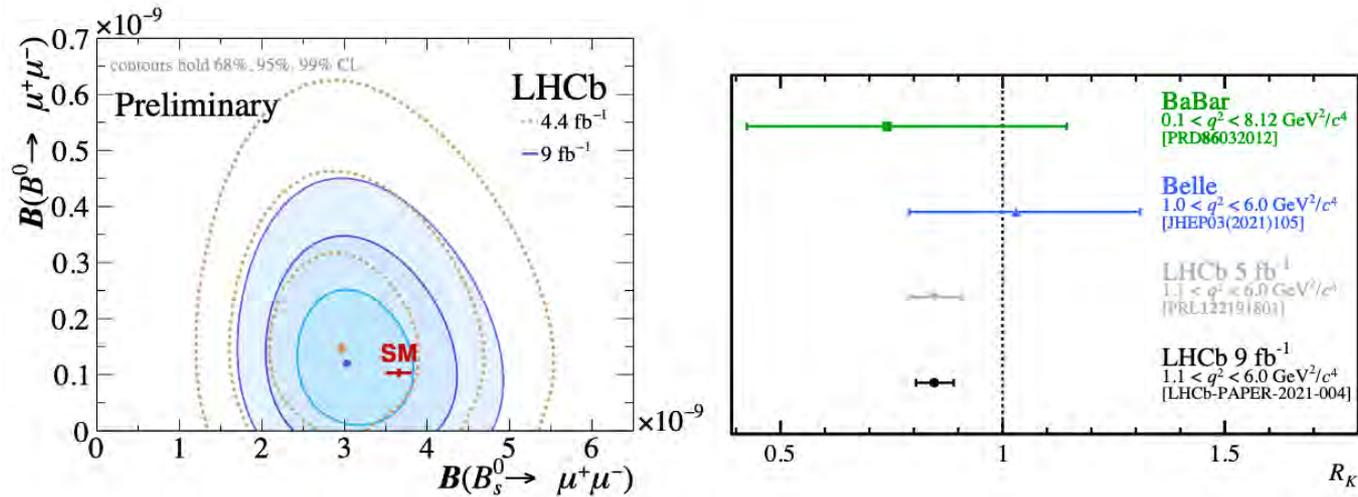


- ▶ Offer multitude of observables complementary to $B_s^0 \rightarrow l^+ l^-$ measurements.

Conclusions

Using the full LHCb dataset to date, presented:

1. Single most precise measurement of $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$, improved precision on $\tau_{\mu^+ \mu^-}$ and first every limit on $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma$
2. Updated R_K measurement $\rightarrow 3.1\sigma$ departure from LFU!
 \rightarrow Reframing discussion on flavour anomalies



Complementarity between R_K and $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ measurements crucial moving forward.

"...perhaps the end of the beginning."